

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



Monitorização da Duna de São João da Caparica

Daniela Tatiana Espanhol Rato

**Mestrado em Geologia do Ambiente, Riscos Geológicos e Ordenamento do
Território**

Dissertação orientada por:
Professor Doutor César Freire Andrade

Agradecimentos

A realização deste trabalho não teria sido possível sem a presença e a contribuição de um grupo de pessoas, a quem queria exprimir os meus agradecimentos.

Em primeiro lugar, queria agradecer ao meu orientador, Professor Doutor César Andrade, pela sua orientação, disponibilidade e pelos seus constantes ensinamentos que em muito contribuíram para o meu crescimento profissional e pessoal.

Em segundo lugar, queria agradecer à Mestre Ana Bastos pelo seu acompanhamento nos trabalhos de campo, pela sua total disponibilidade e ajuda na resolução de questões que foram surgindo no decorrer deste trabalho.

Agradeço também à Professora Doutora Maria da Conceição Freitas, por se ter demonstrado sempre disponível a ajudar.

Queria agradecer à minha amiga Daniela Fernandes pela amizade, apoio e pelo encorajamento que me deu durante este ano e meio de trabalho. E agradecer especialmente ao meu amigo Miguel Inácio pelo seu companheirismo, incansável ajuda, total disponibilidade e senso crítico que contribuíram para este ser um trabalho melhor que o possível.

Queria agradecer especialmente à minha mãe e irmão pelo apoio e paciência que demonstraram durante este percurso.

Agradeço à Filipa Fernandes, à Vera Lopes, à Tânia Ferreira e à Ana Costa, pela amizade e pelo apoio demonstrado ao longo deste trabalho.

Queria também deixar um agradecimento às pessoas que me acompanharam nos trabalhos de campo: Soraia Teixeira, Cesária Gomes, Teresa Cebola, Rita Magalhães, Ana Silva, Rita Villanueva, Ivana Bosnic, Mónica Ribeiro e João Hermínio.

Queria expressar também os meus agradecimentos ao Doutor Pedro Miranda do Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia (DEGGE, FCUL), à Doutora Maria Antónia Valente do Instituto Dom Luiz (IDL, FCUL), ao Doutor Miguel Miranda e ao Doutor Jorge Marques do Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), pelo fornecimento dos dados de vento.

Agradeço também à Doutora Patrícia Silva da Câmara Municipal de Almada do Departamento de Estratégia e Gestão Ambiental Sustentável (CMA/DEGAS), pelas informações cedidas sobre o Projecto ReDuna.

Os trabalhos desenvolvidos neste estudo beneficiaram de suporte financeiro dos Projectos Desenvolvimento de trabalhos técnico-científicos de Delimitação das Vulnerabilidades Territoriais, Monitorização dos Impactos de Episódios Climáticos Extremos, e Caracterização da Evolução Geoambiental do Concelho de Almada, celebrado entre a Câmara Municipal de Almada e a FFCUL, envolvendo o Departamento de Geologia da FCUL, e do Instituto Dom Luiz (Projecto UID/GEO/50019/2013-Instituto dom Luiz).

Resumo

A presente dissertação incide sobre a monitorização morfológica sazonal da duna frontal de São João da Caparica entre os meses de Fevereiro de 2015 e Novembro de 2016, após uma intervenção de recuperação e restauro dunar no âmbito do projecto ReDuna.

A monitorização da duna consistiu na realização de 8 campanhas de campo nas quais se efectuou o levantamento topográfico da extensão total do corpo dunar e de dois perfis transversais à duna, ao longo dos quais se recolheram amostras de areia que foram caracterizadas texturalmente. Com base nos dados de campo, foram gerados modelos digitais de terreno e construídos mapas de diferença de elevação que permitiram avaliar a evolução morfológica da duna, calcular volumes de acreção/erosão entre campanhas e estimar a magnitude do balanço sedimentar.

Adicionalmente, realizou-se o processamento de três séries de dados de vento (modelados numericamente e medidos no Instituto Dom Luiz e na Praia da Rainha) com o intuito de relacioná-los com a evolução morfológica da duna de São João da Caparica durante os 21 meses de monitorização. Nesse sentido, comparou-se a distribuição direccional das ocorrências de vento, estimaram-se valores de balanço sedimentar a partir da determinação de taxas de transporte sólido, com base nas fórmulas empíricas de Bagnold (1954), e posteriormente compararam-se os resultados com os valores obtidos a partir dos levantamentos topográficos.

Os três domínios amostrados são formados por areias texturalmente semelhantes. Trata-se de areias de grão médio a fino, bem calibradas e com distribuição preferencialmente simétrica a assimétrica no sentido dos grosseiros.

A duna de São João da Caparica é morfologicamente formada por um cordão dunar primário à cota 5 m, que não era visível na primeira campanha de monitorização (Fevereiro de 2015) e que tem vindo a desenvolver-se junto à fiada de paliçadas exterior, e um cordão dunar secundário estável com cota apical de 8 m.

Os resultados das campanhas de campo revelaram que a distribuição espacial das erosões e acumulações de areia na duna são descontínuas no espaço e no tempo. Em algumas campanhas verificou-se a formação de uma faixa contínua de acreção significativa que corresponde ao crescimento de um novo cordão dunar primário, ainda incipiente. O balanço sedimentar da duna entre campanhas reflecte elevada variabilidade sazonal, estimando-se um balanço global de +5000 m³.

A comparação entre as três séries de dados no intervalo 2002-2012 permitiu concluir que existe semelhança na distribuição direccional entre os ventos totais do modelo numérico e da Praia da Rainha. A mesma comparação aplicada aos ventos eficazes, para o mesmo intervalo de tempo, não permitiu identificar uma clara relação entre os resultados. A magnitude do balanço sedimentar determinado para a duna de São João da Caparica com base no processamento dos dados de vento do Instituto Dom Luiz, no intervalo de tempo contemporâneo às campanhas de monitorização, foi de +1300 m³ demonstrando fraca correlação com os dados obtidos através dos levantamentos topográficos para o mesmo período.

Palavras chave: Duna Costeira, Monitorização, Morfologia, Balanço Sedimentar, Ventos.

Abstract

The present dissertation focuses on the seasonal morphological monitoring of the frontal dune of São João da Caparica between February 2015 and November 2016, after a dune intervention and restoration within the ReDuna project.

Monitoring of the dune consisted of 8 field campaigns in which a topographic survey of the total extension of the dune body and two cross - sections of the dune was carried out along where sand samples were collected, and were characterized texturally. Based on the field data, digital terrain models were generated and elevation difference maps were constructed to evaluate the morphological evolution of the dune, to calculate accretion/erosion volumes between field campaigns and to estimate the magnitude of the sedimentary balance.

In addition, three wind data series (numerically and measured at the Instituto Dom Luiz and at Praia da Rainha) were processed with the aim of relating them to the morphological evolution of the dune of São João da Caparica during the 21 months of monitoring. Accordingly, we compared the directional distribution of the wind occurrences, estimating sediment balance values from the determination of solid transport rates based on the empirical formulas of Bagnold (1954) and then comparing the results with the values obtained from topographic surveys.

The three sampled domains consist of texturally similar sands. They are medium to fine grain sands, well calibrated and with a preferably symmetrical to an asymmetric distribution towards the coarse ones.

The frontal dune of São João da Caparica is morphologically formed by a primary dune strand at the 5 m elevation, which was not visible in the first monitoring field campaign (February 2015) and has developed along the outer palisade strand, and a stable secondary dune line with an 8 m apical dimension.

The results of the field campaigns revealed that the spatial distribution of sand erosions and accumulations in the dune are discontinuous in space and time. In some field campaigns, the formation of a continuous band of significant accretion corresponding to the growth of a new, still incipient, primary dune strand was observed. The sedimentary balance of the dune between field campaigns reflects high seasonal variability, with an overall estimated balance of +5000 m³.

The comparison between the three data series in the 2002-2012 interval allowed to conclude that there is similarity in the directional distribution between the total winds of the numerical model and Praia da Rainha. The same comparison applied to the effective winds, for the same interval, did not allow to identify a clear relation between the results. The magnitude of the sedimentary balance determined for the São João da Caparica dune based on the Instituto Dom Luiz wind data processing in the contemporary interval for the monitoring fields campaigns was of +1300 m³ demonstrating a weak correlation with the data obtained through the surveys for the same period.

Key words: Coastal Dune, Monitoring, Morphology, Sedimentary Balance, Winds.

Índice

Agradecimentos.....	I
Resumo.....	III
Abstract	V
Índice de Figuras	IX
Índice de Tabelas.....	XIII
Índice de Equações.....	XV
Lista de Abreviaturas.....	XVII
Lista de Símbolos	XIX
1. Introdução e Objectivos	1
2. Projecto ReDuna	3
3. Enquadramento da Área de Estudo.....	7
3.1 Enquadramento Geográfico	7
3.2 Enquadramento Geológico.....	8
3.3 Enquadramento Geomorfológico	9
4. Processos Eólicos e Morfologia.....	11
4.1 Processos Eólicos.....	11
4.2 Transporte Sólido Eólico	20
4.3 Morfologia das Dunas Costeiras	23
5. Metodologias.....	27
5.1 Trabalho de Campo.....	27
5.1.1 Levantamento topográfico da duna	27
5.1.2 Estacas de controlo.....	29
5.1.3 Sedimentos	30
5.2 Trabalho de Laboratório.....	32
5.2.1 Granulometria de sedimentos	32
5.3 Trabalho de Gabinete	33
5.3.1 Processamento de dados de campo.....	33
5.3.2 Natureza e processamento de dados de vento	35
6. Resultados e Discussão	39
6.1 Sedimentos.....	39
6.2 Morfologia e evolução morfológica.....	44
6.2.1 Morfologia.....	44
6.2.2 Distribuição espacial das diferenças de elevação	49

6.2.3	Variações volumétricas e balanço sedimentar.....	59
6.3	Vento e Transporte sólido eólico potencial.....	63
6.3.1	Vento total	63
6.3.2	Vento eficaz.....	68
6.3.3	Transporte Sólido Eólico e Balanço Sedimentar	71
7.	Conclusões	77
8.	Considerações Finais.....	79
9.	Referências Bibliográficas	81
10.	Anexos	85

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Danos estruturais no equipamento Sea Salt & Pepper - duna de São João da Caparica (18-02-2014).....	3
Figura 2.2 – Pormenor de uma célula de retenção sedimentar formada pelas paliçadas.....	4
Figura 2.3 – Primeira fiada de paliçadas parcialmente soterrada (à esquerda) e nova fiada de paliçadas (à direita).	5
Figura 3.1 – Enquadramento geográfico da área de estudo: A - Portugal continental; B - Praia de São João da Caparica, no litoral oceânico do concelho de Almada; C - Duna (polígono) e praia de São João da Caparica.	7
Figura 3.2 – Enquadramento geológico da área de estudo (adaptado de CMA/DEGAS & FCT/CEG (2005)).	9
Figura 3.3 – Enquadramento geomorfológico da área de estudo (adaptado de CMA/DEGAS & FCT/CEG (2005)).	10
Figura 4.1 – Distribuição vertical da velocidade do vento em função da altura, na ausência de transporte (adaptado de Pye & Tsoar, 2009).	12
Figura 4.2 – Variação da velocidade de atrito crítica em função da dimensão média dos grãos (Pye & Tsoar, 2009).	13
Figura 4.3 – Distribuição vertical do vento em função da altura, na ausência (curvas a tracejado) e presença de transporte sólido (curvas a cheio) (Pye & Tsoar, 2009).	14
Figura 4.4 – Variação da taxa de transporte sólido em função da velocidade de atrito e do diâmetro médio das partículas (adaptado de Belly (1964)).	16
Figura 4.5 – Variação do valor da velocidade de atrito crítica com o aumento do teor em água do sedimento (Hotta et al., 1984).	17
Figura 4.6 – Variação da taxa de transporte sólido com o aumento da velocidade de atrito para diferentes teores em água (Hotta et al., 1984).	18
Figura 4.7 – Modos de transporte sólido eólico (adaptado de Lancaster (2009)).	20
Figura 4.8 – Relação entre a velocidade de atrito crítica e a dimensão média do sedimento como condicionantes do modo de transporte sólido (adaptado de Spies & McEwan (2000)).	21
Figura 4.9 – Mecanismos de transporte das partículas (Pye & Tsoar, 2009).	22
Figura 4.10 – Trajectória balística da saltação dos grãos quando incorporados na coluna de ar (Pye & Tsoar, 2009).	22
Figura 4.11 – Duna frontal incipiente (à frente) e da duna frontal estabilizada (atrás), vista de mar para terra.....	25
Figura 4.12 – Representação esquemática da morfologia da duna frontal de São João da Caparica ao longo do perfil PF1.....	25
Figura 5.1 – Nuvem de pontos levantados na duna frontal de São João da Caparica (14-09-2016).	27
Figura 5.2 – Localização dos perfis de controlo e amostragem PF1 e PF2 e dos perfis de amostragem PCC2 e PCC6.	29
Figura 5.3 – Localização das estacas E1 e E2 no perfil PF1.	29
Figura 5.4 – Localização dos pontos de amostragem no perfil PF1.....	31
Figura 5.5 – Localização dos pontos de amostragem no perfil PF2.....	31
Figura 5.6 – Localização dos pontos de modelação e medição das séries de dados de vento.....	35
Figura 6.1 – Caracterização textural do sedimento da berma.....	39
Figura 6.2 – Caracterização textural do sedimento da berma.....	40
Figura 6.3 – Caracterização textural do sedimento da face de praia.	40

Figura 6.4 – Caracterização textural do sedimento da face de praia	41
Figura 6.5 – Caracterização textural do sedimento da duna.....	41
Figura 6.6 – Caracterização textural do sedimento da duna.....	42
Figura 6.7 – Caracterização textural das areias de duna, berma e face de praia.	42
Figura 6.8 – Caracterização textural das areias de duna, berma e face de praia.	43
Figura 6.9 – Modelo digital de terreno obtido da campanha 1 e perfis de controlo PFA, PFB e PFC (Fevereiro de 2015).	45
Figura 6.10 – Modelo digital de terreno obtido da campanha 8 e perfis de controlo PFA, PFB e PFC (Novembro de 2016).....	46
Figura 6.11 – Perfil PFA interpolado a partir do MDT das campanhas 1 e 8.	47
Figura 6.12 – Perfil PFB interpolado a partir do MDT das campanhas 1 e 8.	47
Figura 6.13 – Perfil PFC interpolado a partir do MDT das campanhas 1 e 8.	47
Figura 6.14 – Mapa de diferenças de elevação entre os MDT das campanhas 1 e 2 (Fevereiro e Maio de 2015).....	49
Figura 6.15 – Mapa de diferenças de elevação entre os MDT das campanhas 2 e 3 (Maio e Dezembro de 2015).....	50
Figura 6.16 – Mapa de diferenças de elevação entre os MDT das campanhas 3 e 4 (Dezembro de 2015 e Fevereiro de 2016).....	51
Figura 6.17 – Mapa de diferenças de elevação entre os MDT das campanhas 4 e 5 (Fevereiro e Março de 2016).....	52
Figura 6.18 – Mapa de diferenças de elevação entre os MDT das campanhas 5 e 6 (Março e Junho de 2016)	53
Figura 6.19 – Mapa de diferenças de elevação entre os MDT das campanhas 6 e 7 (Junho e Setembro de 2016).....	54
Figura 6.20 – Mapa de diferenças de elevação entre os MDT das campanhas 7 e 8 (Setembro e Novembro de 2016).....	55
Figura 6.21 – Mapa de diferenças de elevação entre os MDT das campanhas 1 e 4 (Fevereiro de 2015 e Fevereiro de 2016).....	56
Figura 6.22 – Mapa de diferenças de elevação entre os MDT das campanhas 4 e 8 (Fevereiro e Novembro de 2016).....	57
Figura 6.23 – Mapa de diferenças de elevação entre os MDT das campanhas 1 e 8 (Fevereiro de 2015 e Novembro de 2016).....	58
Figura 6.24 – Variação dos ganhos e perdas sedimentares registados na duna.....	60
Figura 6.25 – Variação do balanço sedimentar e da retenção volumétrica registados na duna.	60
Figura 6.26 – Distribuição direccional das ocorrências de vento modelado (modelo numérico: 2001- 2011).	63
Figura 6.27 – Distribuição direccional do vento medido na estação do Monte da Caparica: 2001- 2011(adaptado de Barata et al., (2013)).	64
Figura 6.28 – Distribuição direccional do vento modelado (modelo numérico: 2002-2012).....	65
Figura 6.29 – Distribuição direccional do vento medido (IDL: 2002-2012).....	66
Figura 6.30 – Distribuição direccional do vento medido (Praia da Rainha: 2002-2012).	67
Figura 6.31 – Distribuição direccional do vento modelado (modelo numérico: 2002-2012).....	68
Figura 6.32 – Distribuição direccional do vento medido (IDL: 2002-2012).....	69
Figura 6.33 – Distribuição direccional do vento medido (Praia da Rainha: 2002-2012).	70
Figura 6.34 – Distribuição direccional do vento modelado (modelo numérico: 1989-2012).....	72

Figura 6.35 – Variação das taxas de transporte entre a praia e a duna, inferidos a partir do regime de ventos.	74
Figura 6.36 – Variação do balanço sedimentar na duna, inferido a partir do regime de ventos.	74
Figura 6.37 – Correlação entre os volumes obtidos a partir dos MDT e do processamento dos dados de vento.	76

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Espécies vegetais introduzidas na duna primária e secundária de São João da Caparica (DECAM/CMA, 2014).....	4
Tabela 5.1 – Coordenadas do ponto de referência CC9.	28
Tabela 5.2 – Datas das campanhas do levantamento da duna.	28
Tabela 5.3 – Datas das campanhas do levantamento dos perfis PF1 e PF2.	28
Tabela 5.4 – Data e localização da amostragem de sedimento.	30
Tabela 5.5 – Resumo dos pontos utilizados na geração dos MDT.....	33
Tabela 5.6 – Dados de vento processados neste trabalho.....	35
Tabela 5.7 – Parâmetros utilizados na determinação das taxas de transporte sólido eólico.....	37
Tabela 6.1 – Caracterização textural das areias de duna e praia segundo vários autores.....	43
Tabela 6.2 – Valores de EMQ.....	44
Tabela 6.3 – Estimativa de balanço sedimentar da duna entre campanhas consecutivas de monitorização.	59
Tabela 6.4 – Estimativa de balanço sedimentar da duna entre campanhas de monitorização.....	59
Tabela 6.5 – Frequências de ocorrência de vento modelado (modelo numérico: 2001-2011).....	64
Tabela 6.6 – Frequência de ocorrências de vento medido na estação do Monte da Caparica: 2001-2011.	64
Tabela 6.7 – Frequências de ocorrência de vento modelado (modelo numérico: 2002-2012).....	65
Tabela 6.8 – Frequências de ocorrência de vento medido (IDL: 2002-2012).....	66
Tabela 6.9 – Frequências de ocorrência de vento medido (Praia da Rainha 2002-2012).	67
Tabela 6.10 – Frequências de ocorrência de vento modelado (modelo numérico: 2002-2012).....	68
Tabela 6.11 – Frequências de ocorrência de vento medido (IDL: 2002-2012).....	69
Tabela 6.12 – Frequências de ocorrência de vento medido (Praia da Rainha 2002-2012).	70
Tabela 6.13 – Taxas de transporte para condições de superfície seca e húmida com base nos dados do modelo numérico: 1989-2012.	71
Tabela 6.14 – Frequências de ocorrência de vento modelado (modelo numérico: 1989-2012).....	72
Tabela 6.15 – Transporte sólido eólico potencial no período contemporâneo da monitorização da duna.	73
Tabela 6.16 – Transporte sólido eólico potencial no período contemporâneo da monitorização da duna.	74

Índice de Equações

Equação 4.1 – Distribuição vertical da velocidade do vento segundo a lei de Von Karman (Bagnold, 1941).....	11
Equação 4.2 – Velocidade de atrito crítica (Bagnold, 1954).....	12
Equação 4.3 – Ordenada do ponto focal (Zingg, 1952).	14
Equação 4.4 – Abcissa do ponto focal (Zingg, 1952).	14
Equação 4.5 – Velocidade de atrito (Bagnold, 1941).....	15
Equação 4.6 – Taxa de transporte sólido eólico (Bagnold, 1954).....	15
Equação 4.7 – Velocidade de atrito crítica sobre uma superfície de areia molhada (Hotta et al., 1984).	17
Equação 4.8 – Velocidade de atrito crítica para superfície húmida com o parâmetro da taxa de evaporação (Hotta et al., 1984).	18
Equação 4.9 – Velocidade de atrito crítica (cm/s) para superfície húmida (Hsu & Weggel, 2002).....	19
Equação 5.1 – Fórmula do erro médio quadrático.	34
Equação 6.1 – Equação reduzida da recta de tendência.	60

Lista de Abreviaturas

APA – Agência Portuguesa do Ambiente;
CEG – Centro de Estudos Geográficos;
CMA – Câmara Municipal de Almada;
DECAM – Departamento de Energia, Clima, Ambiente e Mobilidade;
DEGAS – Departamento de Estratégia e Gestão Ambiental Sustentável;
EMQ – Erro Médio Quadrático;
ETRS89 / PT-TM06 – European Terrestrial Reference System 1989 / Portuguese Transverse Mercator Projection de 2006;
FCUL – Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa;
GNSS – *Global Navigation Satellite System*;
GPS-RTK – *Global Positioning System-Real Time Kinematic*;
IDL – Instituto Dom Luiz;
INAG – Instituto Nacional da Água (actualmente extinto, incorporado na Agência Portuguesa do Ambiente)
IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera;
MDT – Modelo Digital de Terreno;
TIN – *Triangular Irregular Networks*;
WRF – *Weather Research Forecast*.

Lista de Símbolos

I_w – Taxa de evaporação;
 w – Teor em água;
 q – Taxa de transporte sólido eólico;
 g – Aceleração gravítica;
 d – Diâmetro médio das partículas;
 Z – Distância do rotor do anemómetro à superfície topográfica;
 U – Velocidade do vento à distância Z do solo;
 D – Diâmetro médio das partículas *standard*;
 A – Constante adimensional (Bagnold,1954);
 σ_1 – Desvio padrão gráfico inclusivo;
 SKI – Assimetria gráfica inclusiva;
 M_z – Dimensão média das partículas;
 $K\sigma$ – Curtose gráfica;
 C – Constante adimensional (Bagnold,1954);
 ρ_s – Massa específica das partículas;
 ρ_a – Massa específica do ar;
 Z' – Ordenada do ponto focal;
 U_* – Velocidade de atrito;
 U' – Abcissa do ponto focal;
 $U_{*_{tw}}$ – Velocidade de atrito crítica para superfície húmida;
 $U_{*_{t}}$ – Velocidade de atrito crítica para superfície seca.

1. Introdução e Objectivos

A presente dissertação foi realizada no âmbito do Curso de Mestrado em Geologia do Ambiente, Riscos Geológicos e Ordenamento do Território, da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL).

Este estudo reúne os trabalhos e resultados da monitorização realizada na duna de São João da Caparica, entre Fevereiro de 2015 e Novembro de 2016, no âmbito do projecto ReDuna. Os trabalhos foram orientados pelo Professor Doutor César Andrade (Departamento de Geologia da FCUL).

As dunas costeiras são corpos arenosos que se formam através do transporte eólico de areias, para terra da alta praia. A formação destes corpos depende, entre outros factores, da disponibilidade de sedimento seco e da orientação e magnitude do vento, enquanto a sua manutenção depende, em grande parte, da presença de vegetação que promova a fixação das areias.

Os aparelhos dunares são parte integrante do sistema costeiro e limitam a passagem do ambiente marinho ao ambiente terrestre, desempenhando funções importantes no sistema costeiro: comportam-se como barreiras naturais ao galgamento oceânico e à acção de ventos de mar (*onshore*) e funcionam como reserva sedimentar da praia durante episódios de tempestade. Os ambientes dunares apresentam ainda uma grande diversidade ecológica ao nível das comunidades de plantas e animais.

As dunas têm estado sujeitas a vários tipos de pressões antrópicas, inicialmente devido à extracção de areias para a indústria da construção (actualmente proibida) e mais recentemente devido à ocupação para uso balnear com consequente pisoteio (extensivo e intensivo) e remodelação morfológica. Como resultado destas acções, os corpos dunares têm apresentado uma diminuição da sua robustez e modificações na sua morfologia natural. Apresentam-se, assim, cada vez mais vulneráveis durante condições extremas de agitação e a ocorrência de galgamentos e rompimentos tornaram-se cada vez mais frequentes.

Desta forma, é cada vez mais importante a implementação de medidas que promovam a protecção e recuperação das dunas, assim como a criação de sistemas de monitorização que permitam avaliar a resposta das mesmas aos agentes naturais e à actividade antrópica.

O trabalho desenvolvido na presente dissertação permite avaliar a evolução morfológica da duna de São João da Caparica face à implementação de um projecto de recuperação e restauração ecológica.

Configuram objectivos do presente trabalho:

- Monitorizar o corpo dunar de São João da Caparica, no que respeita ao seu conteúdo sedimentar e variação morfológica a curta escala temporal (sazonal);
- Processar os dados de vento disponíveis para efeitos de caracterização do clima de vento e do forçamento eólico contemporâneos da monitorização morfológica;
- Relacionar a morfologia do sistema dunar e a sua evolução morfológica com o regime de ventos.

A dissertação apresenta a seguinte estrutura:

No capítulo 1 apresenta-se uma introdução ao elemento de estudo e identificam-se os objectivos. O capítulo 2 contempla uma breve descrição sobre o projecto ReDuna. O capítulo 3 enquadra a área de estudo a nível geográfico, geológico e geomorfológico. O capítulo 4 reúne conceitos sobre os processos eólicos, o transporte sólido associado e a morfologia das dunas costeiras. O capítulo 5 resume as metodologias utilizadas no desenvolvimento dos trabalhos de campo, gabinete e laboratório. No capítulo 6 apresentam-se e discutem-se os resultados alcançados que incidem essencialmente sobre a textura dos sedimentos, a morfologia e o balanço volumétrico da duna e sobre o processamento dos dados de vento. O capítulo 7 contempla as conclusões sobre o estudo desenvolvido. Por fim, o capítulo 8 apresenta algumas considerações sobre o presente trabalho.

2. Projecto ReDuna

A monitorização da duna de São João da Caparica surgiu no âmbito da implementação do Projecto ReDuna – Recuperação e Restauração Ecológica do Sistema Dunar de São João da Caparica, desenvolvido pela Câmara Municipal de Almada (CMA) em parceria com a Agência Portuguesa do Ambiente (APA). Esta iniciativa surgiu após a ocorrência dos temporais do Inverno de 2013/2014 que originaram episódios de erosão na praia e na duna de São João da Caparica.

O temporal *Christina* (ou *Hércules*) afectou o litoral português entre os dias 3 e 7 de Janeiro de 2014, provocando alterações morfológicas ao longo de toda a faixa costeira e a destruição de estruturas. A combinação de condições particulares de forçamento oceanográfico (ondas com alturas significativas extremas, atingindo os 9 m e períodos invulgarmente longos de aproximadamente 28 s), contribuíram para que este fosse um evento muito energético que se expressou pela magnitude do impacto sobre o litoral (APA, 2014). Registaram-se galgamentos e inundações costeiras, rebaixamento dos perfis de praia e erosão de cordões dunares, nomeadamente na praia e duna de São João da Caparica. Em contraste, em algumas praias foi também registada acreção relacionada com as especificidades geológicas e morfológicas locais que disponibilizaram sedimento à praia (Diogo *et al.*, 2014).

A praia e duna de São João da Caparica sofreram um grande impacto com a ocorrência dos eventos tempestivos, tendo ocorrido um rebaixamento geral da superfície de praia, acompanhado do recuo da linha de costa em aproximadamente 14 m, galgamento localizado do aparelho dunar com consequente amputação do mesmo no sector sul da praia, inundação dos parques de estacionamento localizados junto ao tardoz da duna e danos estruturais nos equipamentos de praia (APA, 2014), como é possível observar na Figura 2.1. A praia perdeu não só parte do seu areal para fins balneares nos meses de Verão como também viu fragilizado o seu cordão dunar, tornando o sistema costeiro mais desprotegido face ao impacto de futuras tempestades.



Figura 2.1 – Danos estruturais no equipamento Sea Salt & Pepper - duna de São João da Caparica (18-02-2014).

O objectivo do projecto ReDuna foi promover a resiliência do sistema praia-duna através da restauração ecológica dunar. Entre Dezembro de 2014 e Março de 2015, ocorreu a instalação de paliçadas de vime e a plantação de espécies vegetais características de ambiente dunar.

A intervenção ficou completa com a construção de passadiços e escadas de acesso à praia e com a colocação de placas informativas e de sensibilização ao longo do sopé da duna.

Antes da implementação das paliçadas, a superfície topográfica foi, em parte, remodelada com recurso a meios mecânicos, de modo a construir um perfil transversal “escadeado”. Não houve colocação de areias, apenas modificação da morfologia superficial. As paliçadas de vime, construídas a partir de material vegetal reciclado, foram colocadas em fiadas paralelas e ortogonais ao alongamento da praia, definindo um conjunto de células de retenção (Figura 2.2). No total, a área intervencionada apresenta 1 km de comprimento por 50 m de largura e cada célula de retenção apresenta dimensões de 5 x 5 m ou 7 x 7 m. Os feixes de vime (com 2 m de comprimento total) foram enterrados na areia, deixando 1.5 m expostos acima da superfície topográfica. A presença das paliçadas destina-se a interceptar os grãos de areia que são transportados pelo vento da praia para a duna.

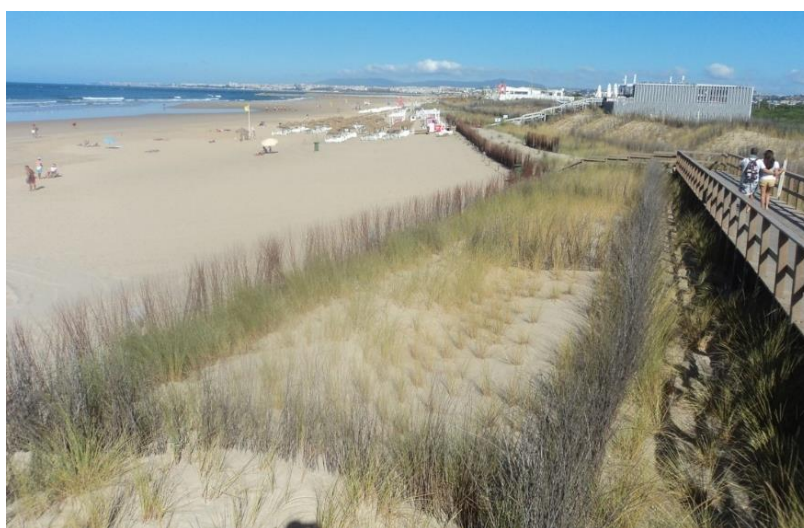


Figura 2.2 – Pormenor de uma célula de retenção sedimentar formada pelas paliçadas.

De modo a fixar e manter a areia transportada pelo vento dentro das células de retenção sedimentar, foram plantadas cerca de 9 espécies, entre o Inverno e a Primavera de 2014/2015. As plantas foram distribuídas segundo as suas especificidades: salinidade, humidade e mobilidade do substrato (CMA, 2011). As espécies introduzidas no aparelho dunar de São João da Caparica encontram-se indicadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Espécies vegetais introduzidas na duna primária e secundária de São João da Caparica (DECAM/CMA, 2014).

Espécies		Quantidade	
		Unidades	%
<i>Ammophila arenaria</i>	Estorno	93	90
<i>Armeria pungens</i>	Arméria	3	3
<i>Juniperus turbinata</i>	Sabina-das-praias	2	2
<i>Lotus creticus</i>	Cornichão-das-areias	1	1
<i>Helichrysum italicum subsp. picardi</i>	Falso-Caril ou perpétua das areias	1	1
<i>Eryngium maritimum</i>	Cardo-marinho	1	1
<i>Thymus carnosus</i>	Tomilho-carnudo	1	1
<i>iberis procumbens</i>	Assembleia-das-areias	0.5	0.50
<i>Corema album</i>	Camarinha	0.1	0.10
Total		103	100

Os passadiços e as escadas foram construídos com o intuito de evitar o pisoteio das dunas por parte dos veraneantes no seu caminho de acesso à praia, existindo no percurso pedonal um miradouro em plataforma elevada, de onde se pode observar toda a extensão da praia e da duna frontal de São João da Caparica.

As placas informativas foram espalhadas ao longo do sopé da duna com o objectivo de informar os utilizadores da praia sobre a importância das dunas como barreira de defesa, da relevância do ecossistema dunar, nomeadamente em termos de habitat de fauna e flora particulares, e ainda sobre a melhor forma de conservar estes corpos dunares.

Em Junho de 2016, ocorreu uma nova intervenção na duna de São João da Caparica, que consistiu na implementação de uma nova fiada de paliçadas, colocadas imediatamente a poente da fiada antiga (Figura 2.3). Esta nova intervenção deveu-se ao facto da antiga fiada encontrar-se parcialmente soterrada e, por isso, já não estar a desempenhar a função pretendida na intercepção dos grãos transportados da praia para a duna.



Figura 2.3 – Primeira fiada de paliçadas parcialmente soterrada (à esquerda) e nova fiada de paliçadas (à direita).

3. Enquadramento da Área de Estudo

3.1 Enquadramento Geográfico

A duna de São João da Caparica localiza-se em Portugal continental, na margem esquerda do estuário do Tejo, a sudoeste de Lisboa. Pertence ao troço costeiro de São João da Caparica localizado a norte das praias da Costa de Caparica (concelho de Almada, distrito de Setúbal) (Figura 3.1).

A praia de São João da Caparica apresenta um comprimento de 1.4 km e uma largura variável entre 140 m, a norte, e 70 m, a sul. Possui uma orientação NNW-SSE, apresentando-se exposta ao forçamento das ondas do oceano, com rumos WNW a SW. Encontra-se limitada a noroeste pelo esporão EV1 (esporão sul da Cova do Vapor) e a sudeste pelo esporão EC7 (esporão norte do pente de defesas transversais da Costa da Caparica). A fronteira oeste da praia materializa-se através do oceano Atlântico e a fronteira leste através do corpo dunar frontal de São João da Caparica.

A duna de São João da Caparica apresenta um alinhamento concordante com o da praia adjacente, tem um comprimento de aproximadamente 1 km e uma extensão lateral entre 25 e 80 m. Apresenta cotas variáveis entre 2 m (na base da duna) e 8 m, (alcançando 10 m na crista da duna, pontualmente).

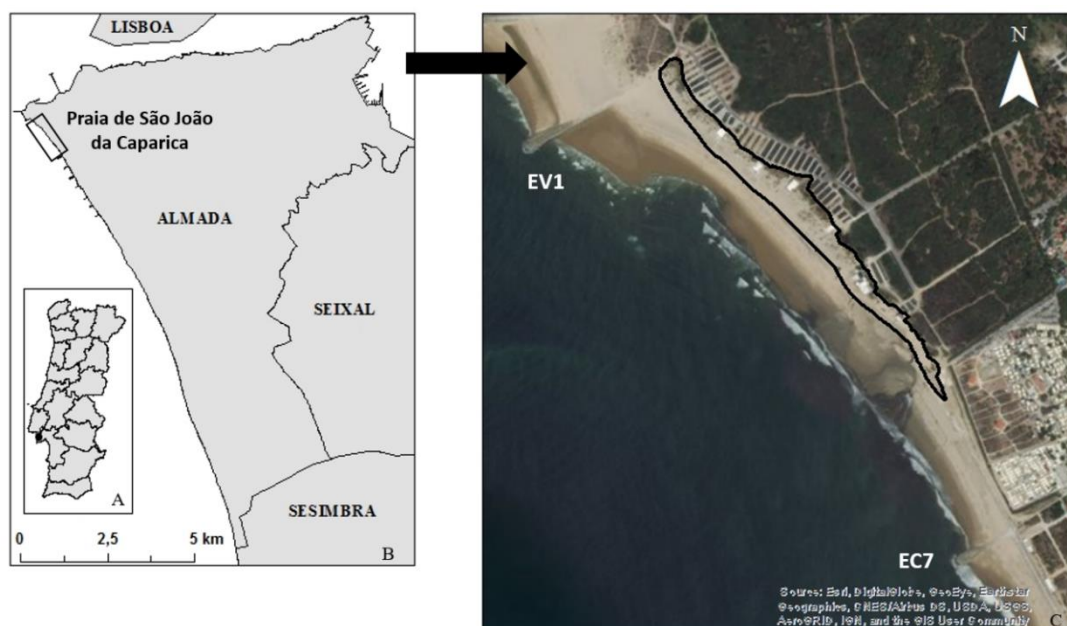


Figura 3.1 – Enquadramento geográfico da área de estudo: A - Portugal continental; B - Praia de São João da Caparica, no litoral oceânico do concelho de Almada; C - Duna (polígono) e praia de São João da Caparica.

3.2 Enquadramento Geológico

A geologia do concelho de Almada encontra-se representada nas Folhas 34-C Cascais e 34-D Lisboa da Carta Geológica de Portugal (Pais *et al.*, 2006 e Ramalho *et al.*, 2001) e na cartografia do Município de Almada (CMA/DEGAS & FCT/CEG, 2005) e pode ser dividida em três regiões consoante a datação das formações aflorantes: região norte - formações do Miocénico; região sudeste - formações do Plio - Plistocénico; região oeste - formações do Holocénico (Figura 3.2).

As formações do Miocénico estão presentes ao longo das arribas da margem sul do rio Tejo e na Arriba Fóssil da Costa da Caparica. Estas formações consistem numa sucessão de areolas, siltes e argilas, com níveis de calcários fossilíferos intercalados (Teixeira, 1990).

O Pliocénico encontra-se representado pela formação das Areias de Santa Marta e está exposto em duas regiões do concelho de Almada. Cobrindo os depósitos do Miocénico aflorantes na Arriba Fóssil da Costa da Caparica, numa faixa contínua que se estende desde a Costa da Caparica até à praia da Pipa, apresentando maior espessura a sul (Teixeira, 1990); é representada por areias feldspáticas que, na representação cartográfica, afloram numa faixa muito estreita (Zbyszewski *et al.*, 1965 e CMA/DEGAS & FCT/CEG, 2005). A mesma formação aflora ao longo da rede de drenagem do concelho, onde a escavação dos vales exumou os depósitos plistocénicos, consistindo aqui em areias de granulometrias diversas e alguns níveis argilosos.

As formações plistocénicas são constituídas por areias e conglomerados (Conglomerado de Belverde), representando depósitos de antigas praias e terraços fluviais (Teixeira, 1990), encontrando-se presentes ao longo do topo da arriba da Fonte da Telha e junto às linhas de água.

O Holocénico é palco das formações mais recentes e com maior interesse para o estudo de caso aqui abordado, incluindo praias e dunas e, consequentemente, areias de praia e de duna, depósitos de vertente e aluviões/aterros (Ramalho *et al.*, 2001). As areias de praia dispõem-se numa faixa contínua ao longo de todo o arco da Caparica – Espichel são areias com dimensão média a fina, bem calibradas e assimetria nula (Freire, 1989). A presença de corpos dunares é visível ao longo da planície costeira da Costa da Caparica até à Fonte da Telha e no topo da arriba, onde ocorrem as dunas mais antigas. As dunas são formadas por areias finas, bem calibradas a muito bem calibradas (Teixeira, 1990). Os depósitos de vertente acumulam-se numa faixa contínua ao longo do sopé da arriba fóssil e resultam da erosão da mesma por acção pluvial e abarrancamento. As aluviões ocorrem ao longo da rede de drenagem do concelho com espessuras muito variáveis (Pais *et al.*, 2006).

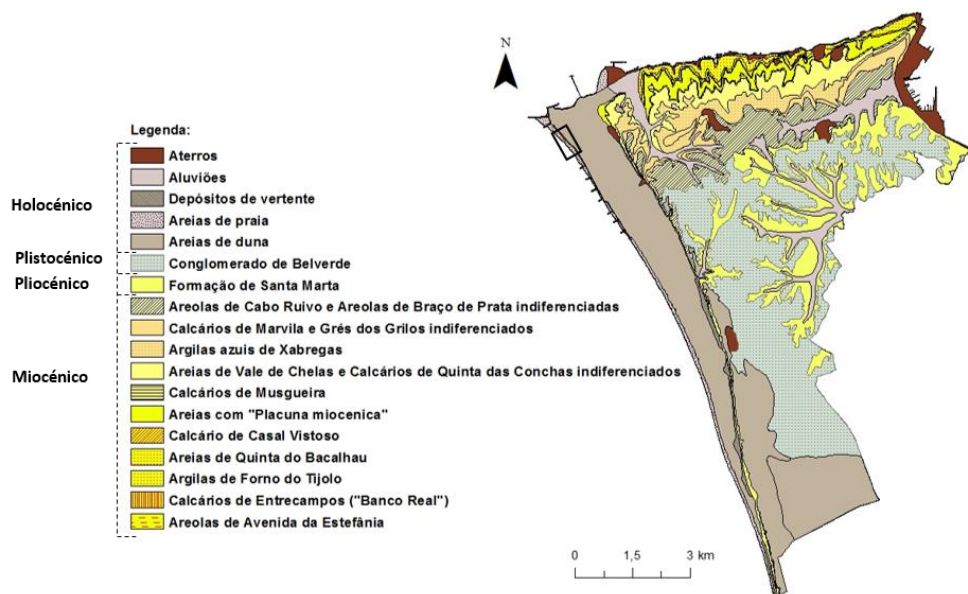


Figura 3.2 – Enquadramento geológico da área de estudo (adaptado de CMA/DEGAS & FCT/CEG (2005)).

3.3 Enquadramento Geomorfológico

O troço costeiro de São João da Caparica encontra-se localizado no arco litoral da Península de Setúbal, limitado a norte pelo esporão norte da Cova do Vapor e a sul pelo Cabo Espichel. A Península comporta duas unidades morfológicas principais: o sinclinal de Albufeira e a cadeia da Arrábida.

A cadeia da Arrábida, desenvolvida essencialmente em materiais calcários e detríticos jurássicos e cretácicos, situa-se na extremidade meridional da Península de Setúbal, possui uma orientação de WSW-ENE e corresponde a uma estrutura orogénica que resulta de um episódio de inversão tectónica da Bacia Lusitaniana (Kulberg *et al.*, 2000).

O sinclinal de Albufeira é assimétrico com inclinações no flanco norte que podem variar entre 5° a 10°. O eixo coincide com o alinhamento da Lagoa de Albufeira e o seu flanco norte é cortado pela falha do Gargalo do Tejo.

A morfologia do concelho de Almada é caracterizada por quatro tipos fundamentais de relevo: Plataforma Litoral, Vales e Vertentes associadas, Planície Litoral e Arriba Fóssil (Freire, 1989), como é possível observar na Figura 3.3. Apenas três tipos de relevo são importantes para a caracterização do troço costeiro em análise.

Plataforma Litoral

A plataforma litoral possui uma orientação N-S sendo limitada a oeste pela Arriba Fóssil da Costa da Caparica. Corresponde a uma antiga superfície aluvionar, do sistema fluvial de um pré Tejo, com cotas que se apresentam mais elevadas a norte, na ordem dos 90 a 100 m e cotas mais baixas a sul, na ordem dos 50 a 80 m (Freire, 1989), sendo a aldeia dos Capuchos um dos pontos mais altos.

Arriba Fóssil

A Arriba Fóssil da Costa da Caparica materializa o limite leste da planície litoral e oeste da plataforma litoral, sendo a intersecção das duas aplanções assinalada por uma vertente muito inclinada.

Desde da Trafaria até à Fonte da Telha esta vertente, originalmente talhada por acção marinha, encontra-se separada do mar pela planície litoral (e por isso constitui uma arriba fóssil). A sul desta praia passa a ser actuada pelo mar e por isso é classificada como arriba viva.

Possui uma orientação variável ao longo do seu comprimento: N25°W, entre a Trafaria e o miradouro dos Capuchos, passando para N18°W no troço até à Praia do Rei e N8°W daqui até à Lagoa de Albufeira (incluindo o troço de arriba viva). As cotas mais elevadas são da ordem dos 80 m a norte do concelho, e diminuem para sul com valores de aproximadamente 40 m. Na extremidade sul, o sopé da arriba (agora viva) coincide com o nível médio do mar (Freire, 1989).

Os declives apresentam inclinações máximas na ordem dos 25 % e ocorrem inclinações mais reduzidas no sopé devido aos depósitos de vertente que suavizam esses valores.

Planície Litoral

A planície litoral representa uma faixa com orientação aproximadamente NNW-SSE, encaixada entre a escarpa da arriba fóssil (a leste) e o oceano Atlântico (a oeste) e caracteriza-se por uma extensão lateral que diminui continuamente para sul. A planície litoral possui três elementos morfológicos principais: uma praia, um cordão dunar exterior longitudinal e um campo de dunas interiores que se estendem desde a Trafaria até à Fonte da Telha e são formados essencialmente por areias. Os dois primeiros elementos são o alvo do estudo da presente tese.

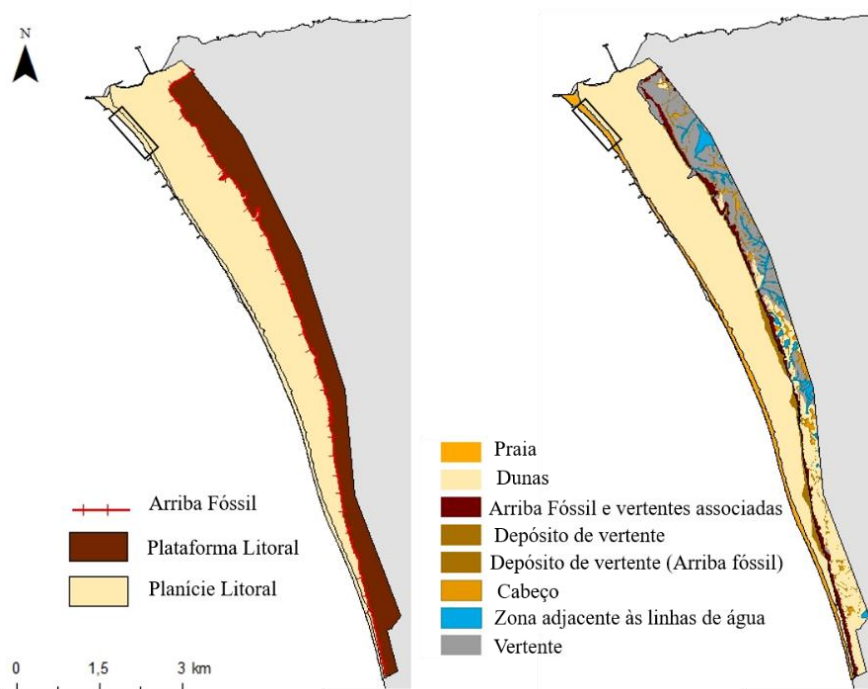


Figura 3.3 – Enquadramento geomorfológico da área de estudo (adaptado de CMA/DEGAS & FCT/CEG (2005)).

4. Processos Eólicos e Morfologia

4.1 Processos Eólicos

As características do vento e dos sedimentos são os factores principais que condicionam o transporte sólido eólico e a edificação de corpos dunares (Hsu & Weggel, 2002). Os parâmetros fundamentais para a caracterização do regime de vento são: o rumo, a intensidade (U), a velocidade de atrito (U_*) e a velocidade de atrito crítica (U_{*t}). A caracterização do sedimento faz-se a partir dos parâmetros do diâmetro médio das partículas (d), de um diâmetro médio *standard* (D) e da massa específica do sedimento (ρ_s).

O escoamento do vento sobre uma superfície arenosa é turbulento e o gradiente vertical da velocidade (que se relaciona com as tensões de atrito ou de corte, induzidas sobre as partículas actuadas pelo vento) expressa-se segundo pela lei de Von Karman-Prandtl (Bagnold, 1941) (Equação 4.1).

$$U = 5.75 U_* \log \frac{Z}{Z'}$$

Equação 4.1 – Distribuição vertical da velocidade do vento segundo a lei de Von Karman (Bagnold, 1941).

Onde¹:

U - velocidade à distância Z do solo (m/s);

5.75 - coeficiente adimensional empírico (segundo Von Karman) e que Zingg (1952, *in* Belly, 1964) modificou para 6.13;

U_* - velocidade de atrito (m/s);

Z - distância ao solo (m);

Z' - ordenada (distância ao solo) do ponto focal (m).

O perfil de velocidades segue uma distribuição logarítmica em função da distância ao solo (Figura 4.1). O módulo do vector velocidade depende da velocidade de atrito (U_*), da altura ao solo (Z) e do parâmetro de rugosidade da superfície (Z').

Na ausência de transporte sólido e para diferentes condições de vento, verifica-se que as curvas de distribuição vertical da velocidade convergem para um ponto específico (ponto focal) muito próximo do solo (no exemplo da Figura 4.1 o valor da cota é de 1.766×10^{-5} m) onde a velocidade praticamente se anula e cuja cota depende apenas da rugosidade da superfície (Bagnold, 1941). A superfície apresenta rugosidade da superfície devido à existência de elementos líticos (grãos de areia) que são os responsáveis pelo desenvolvimento de atrito. Existe uma relação empírica entre o diâmetro médio das partículas de areia (d) e a rugosidade aerodinâmica, descrita pela ordenada do ponto focal ($Z' = 1/30 \times d$) determinada por Bagnold (1954, *in* Belly, 1964).

Basta assim conhecer a velocidade do vento a uma certa distância (conhecida) da superfície e determinar a dimensão média dos grãos que constituem a superfície (por exemplo, através de ensaios granulométricos) para se ficar a conhecer a velocidade de atrito associada a cada medição de velocidade.

¹ Os autores das diferentes formulações apresentadas neste capítulo utilizaram diferentes sistemas de unidades (SI, CGS, Imperial) e, ocasionalmente, mais do que um sistema de unidades na parametrização de variáveis empíricas. Neste trabalho respeitaram-se as formulações tal como habitualmente referidas na literatura, procurando-se escrever as equações de forma a manter consistência em termos de unidades.

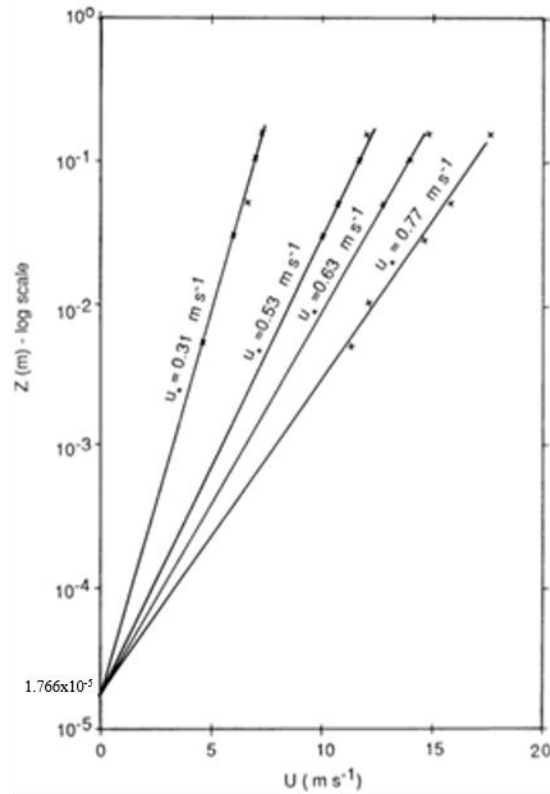


Figura 4.1 – Distribuição vertical da velocidade do vento em função da altura, na ausência de transporte (adaptado de Pye & Tsoar, 2009).

Quando o vento incide sobre uma superfície arenosa, o transporte de sedimento só se inicia quando o valor crítico da velocidade de atrito (U_{*t}) é ultrapassado (Equação 4.2). Este parâmetro depende essencialmente do peso específico e da dimensão das partículas e do peso específico do fluido em que estão mergulhadas (neste caso o ar) (Bagnold, 1941), embora a forma dos grãos e coesão entre as partículas também influencie o valor deste limiar (Pye & Tsoar, 2009).

$$U_{*t} = A \times \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_a) \times g d}{\rho_a}}$$

Equação 4.2 – Velocidade de atrito crítica (Bagnold, 1954).

Onde:

U_{*t} - velocidade de atrito crítica (cm/s);

A - constante adimensional empírica com valor de 0.1 para grãos com $d \geq 0.25$ mm, segundo Bagnold (1954, in Belly, 1964);

ρ_s - massa específica das partículas (2.65 g/cm³ para os grãos de quartzo);

ρ_a - massa específica do ar (0.001225 g/cm³);

g - aceleração gravítica (980 cm/s²);

d - diâmetro médio das partículas (cm).

O gráfico da Figura 4.2 demonstra a relação entre a velocidade de atrito crítica e o diâmetro médio dos grãos segundo vários autores. Analisando o comportamento da curva a tracejado, que exprime os resultados obtidos por Bagnold (1941), verifica-se que para $d = 0.01$ mm regista-se um valor de $U_{*t} \approx 0.33$ m/s, esse valor diminui à medida que o valor do diâmetro médio aumenta até valores de $d = 0.09$ mm em que o valor da velocidade crítica alcança um mínimo ($U_{*t} \approx 0.15$ m/s). A partir deste ponto, verifica-se um aumento da velocidade de atrito crítica com o incremento da dimensão média dos grãos, atingindo um valor máximo de $U_{*t} \approx 0.54$ m/s em grãos com diâmetro da ordem de 1.5 mm. Assim, a relação entre o diâmetro médio dos grãos de areia e a velocidade de atrito crítica é sensivelmente linear excepto quando se trata de sedimento fino (areia muito fina, siltes e argilas) com $d < 0.09$ mm. Nestes casos a predominância das forças coesivas entre as partículas é responsável pelo comportamento inverso.

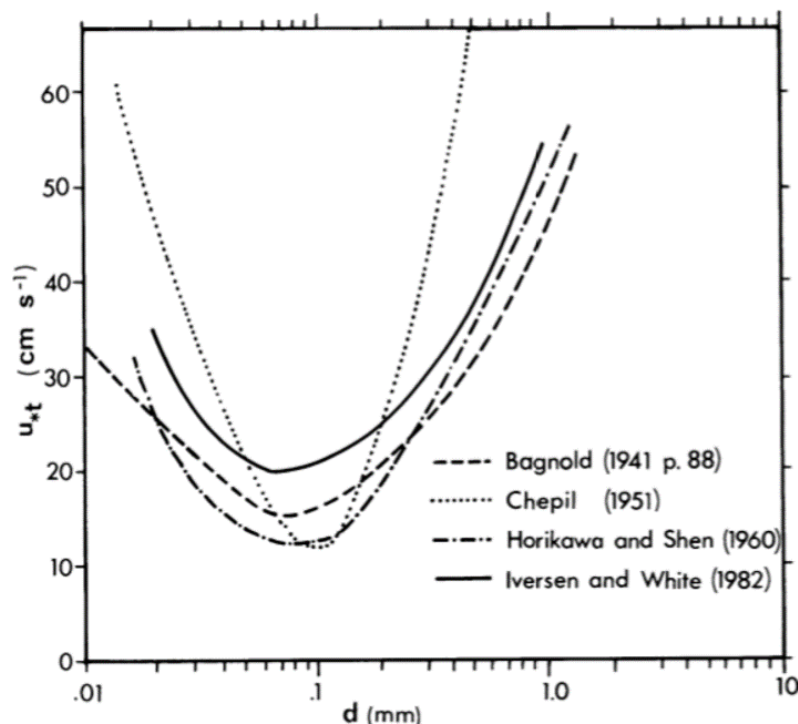


Figura 4.2 – Variação da velocidade de atrito crítica em função da dimensão média dos grãos (Pye & Tsoar, 2009).

Quando o limiar de arranque é ultrapassado, assiste-se ao início da mobilização e transporte dos grãos. Em consequência disso, ocorre modificação da morfologia da superfície e da estrutura da lâmina de ar em movimento.

Na generalidade dos casos, a resposta de uma superfície lisa arenosa ao transporte eólico é a formação de figuras sedimentares do tipo das *ripple-marks*, cujo desenvolvimento aumenta a rugosidade da superfície, o que, por sua vez, tem efeitos retroactivos sobre o escoamento eólico. Embora neste caso a velocidade continue a apresentar um perfil logarítmico, o ponto focal que antes correspondia a um valor de velocidade mínima (diferente de zero) e cota mínima, desloca-se agora para cima e para a direita (Figura 4.3). A distância deste ponto ao solo representa a rugosidade aerodinâmica induzida pela presença de marcas eólicas (ou de vegetação, caso em que a rugosidade será ainda maior).

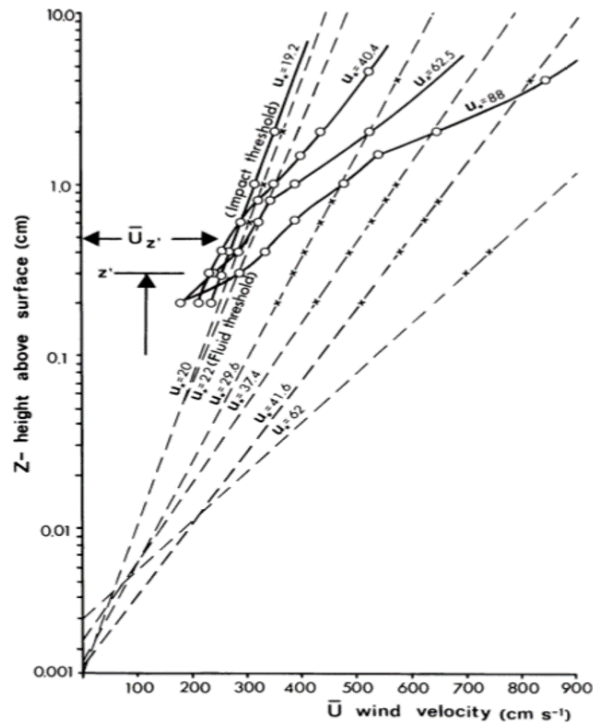


Figura 4.3 – Distribuição vertical do vento em função da altura, na ausência (curvas a tracejado) e presença de transporte sólido (curvas a cheio) (Pye & Tsoar, 2009).

As coordenadas do ponto focal (Z' e U') foram determinadas experimentalmente por diferentes autores e, de acordo com Zingg (1952, *in* Belly, 1964), existe relação entre estes valores e o diâmetro médio das partículas em movimento (Equação 4.3 e Equação 4.4).

$$Z' = 10 \times d$$

Equação 4.3 – Ordenada do ponto focal (Zingg, 1952).

$$U' = 20 \times d$$

Equação 4.4 – Abcissa do ponto focal (Zingg, 1952).

Onde:

Z' - ordenada (distância ao solo) do ponto focal (mm);

U' - abcissa do ponto focal (milhas/hora);

d - diâmetro médio das partículas (mm).

A altura do ponto focal (Z') também pode ser determinada a partir da medição da altura das marcas de ondulação no campo, mas esta relação não é tão simples quando se trata de elementos de rugosidade de dimensão superior (como por exemplo, da vegetação ou das sebes de retenção de areia).

A relação entre a rugosidade da superfície, a velocidade de atrito e a velocidade do vento a uma dada distância do solo, na presença de transporte sólido são descritas pela Equação 4.5 (Bagnold, 1941; Belyy, 1964 e Pye & Tsoar, 2009).

$$U_* = \frac{(U - U')}{6.13 \times \left(\log \frac{Z}{Z'}\right)}$$

Equação 4.5 – Velocidade de atrito (Bagnold, 1941).

Onde:

U_* - velocidade de atrito (m/s);

U - velocidade à distância Z ao solo (m/s);

U' - abcissa do ponto focal (m/s);

6.13 - coeficiente empírico adimensional segundo Zingg (1952, *in* Belly, 1964);

Z - distância do solo (m);

Z' - ordenada (distância ao solo) do ponto focal (m).

A magnitude da velocidade de atrito aumenta com o incremento da velocidade do vento para uma determinada cota e com o aumento da rugosidade da superfície, para a mesma cota e a uma velocidade constante.

A quantificação do transporte sólido eólico foi investigada por vários autores (Pye & Tsoar, 2009), sendo que no presente trabalho adoptou-se a aproximação desenvolvida por Bagnold (1954), com as modificações introduzidas por Belly (1964). De acordo com estes autores, o transporte sólido eólico expressa-se sob a forma de uma taxa de transporte potencial (q), expresso na Equação 4.6, para condições onde o limiar de arranque das partículas é ultrapassado. A taxa de transporte é directamente proporcional ao cubo do valor da velocidade de atrito, pelo que este parâmetro assume grande importância nas estimativas de transporte sólido baseadas unicamente na aplicação deste tipo de relações empíricas.

$$q = C \times \sqrt{\frac{d}{D}} \times \frac{\rho_a}{g} \times U_*^3$$

Equação 4.6 – Taxa de transporte sólido eólico (Bagnold, 1954).

Onde:

q - taxa de transporte sólido eólico (g/cm.s);

C - constante empírica adimensional com valor de 1.8 para areias bem calibradas segundo Bagnold (1954, *in* Belly, 1964);

d - diâmetro médios das partículas (mm);

D - diâmetro médio das partículas *standard* (0.025 cm);

ρ_a - massa específica do ar (0.001225 g/cm³);

g - aceleração gravítica (980 cm/s²);

U_* - velocidade de atrito (cm/s).

A Figura 4.4 representa curvas experimentais obtidas por vários autores que relacionam a taxa de transporte com o incremento da velocidade de atrito. Todas as curvas apresentam o mesmo comportamento, apesar de terem sido testadas a partir de partículas com diâmetros médios diferentes. A curva de Bagnold (1954, *in* Belly, 1964) expressa essa mesma relação para sedimento com $d = 0.25$ mm e verifica-se que a taxa de transporte aumenta exponencialmente com o aumento da velocidade de atrito, como seria expectável.

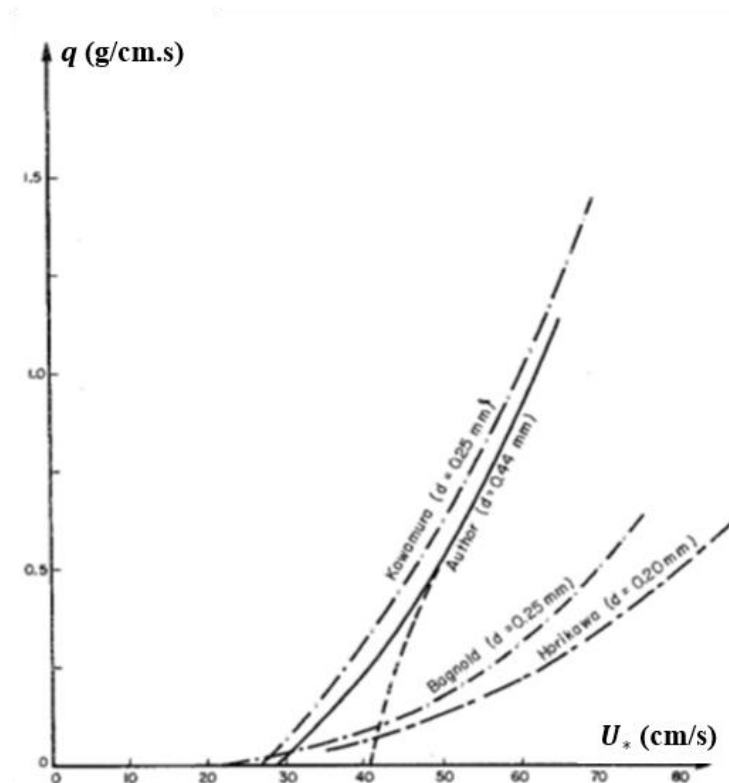


Figura 4.4 – Variação da taxa de transporte sólido em função da velocidade de atrito e do diâmetro médio das partículas (adaptado de Belly (1964)).

Assumindo valores constantes para as variáveis da Equação 4.5 que descrevem a aceleração gravítica e a massa específica do ar, e uma vez conhecida a dimensão das partículas, basta determinar a velocidade a uma distância acima do solo para calcular a taxa de transporte sólido através da combinação da Equação 4.5 e Equação 4.6.

A Equação 4.5 aplica-se apenas para condições em que vento incide sobre uma superfície que se apresenta seca. Em situações em que a superfície se encontre molhada, o comportamento da velocidade de atrito crítica é diferente.

Os trabalhos de Hotta *et al.*, (1984) permitiram verificar que existe variação da velocidade de atrito crítica com o aumento do teor em água (w) da superfície. A Figura 4.5 demonstra a relação entre a velocidade de atrito crítica e o teor em água de uma superfície povoada por partículas de diferentes dimensões, segundo vários autores. Todas as curvas apresentam o mesmo comportamento, evidenciando que a velocidade de atrito crítica aumenta com o aumento do teor em água, para valores de $w > 0.5 \%$ (Tanaka *et al.*, 1954 in Hotta *et al.*, 1984). Para valores de $w < 0.5 \%$ assume-se sem grande erro que a superfície se encontra seca.

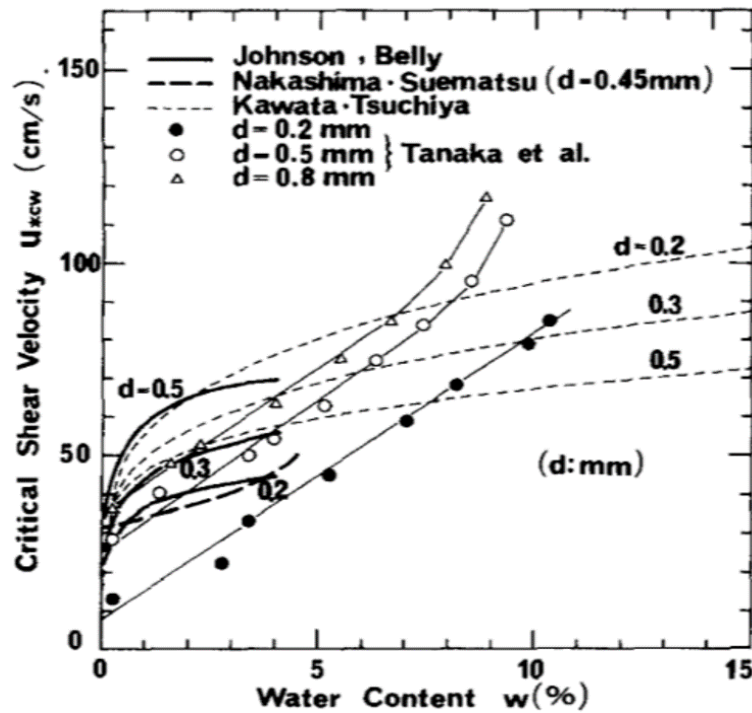


Figura 4.5 – Variação do valor da velocidade de atrito crítica com o aumento do teor em água do sedimento (Hotta et al., 1984).

Porém, segundo Hotta *et al.*, (1984) para teores de água inferiores a 8 %, a velocidade de atrito sofre um aumento constante de aproximadamente 0.075 m/s, com o incremento do teor em água. Assim a Equação 4.2 pode ser reescrita adicionando-se esta modificação (Equação 4.7).

$$U_{*tw} = A \times \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_a) \times g d}{\rho_a}} + 7.5w$$

Equação 4.7 – Velocidade de atrito crítica sobre uma superfície de areia molhada (Hotta et al., 1984).

Onde:

- U_{*tw} - velocidade de atrito crítica para condições de superfície húmida (cm/s);
- A - constante adimensional empírica com valor de 0.1 para grãos com $d \geq 0.25$ mm, segundo Bagnold (1954, *in* Belly, 1964);
- ρ_s - massa específica das partículas (2.65 g/cm³ para os grãos de quartzo);
- ρ_a - massa específica do ar (0.001225 g/cm³);
- g - aceleração gravítica (980 cm/s²);
- d - diâmetro médio das partículas (cm);
- 7.5 - constante de incremento da velocidade (cm/s) aplicada em condições de superfície húmida ($w \leq 8$ %);
- w - teor em água (%).

Como já foi referido acima, existe uma relação directa entre a taxa de transporte e a velocidade de atrito. A Figura 4.6 representa essa mesma relação, mas para condições em que a superfície se encontre molhada, com teores em água entre 3 e 8 %.

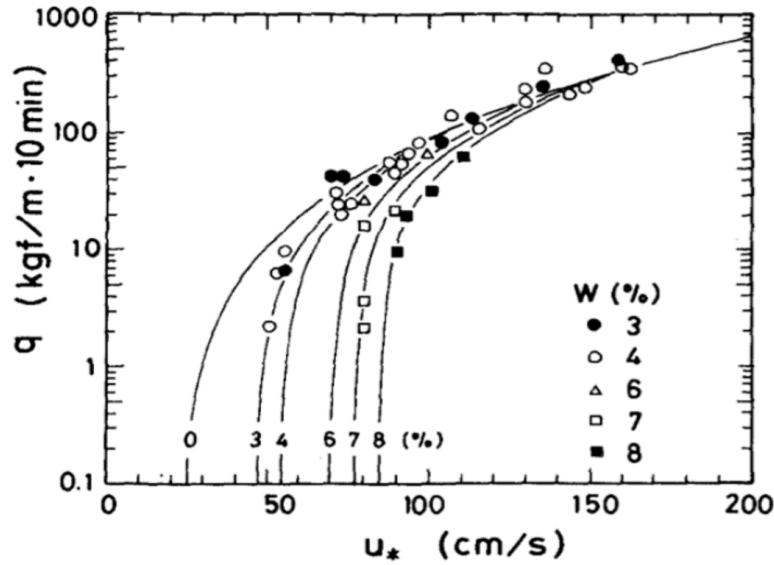


Figura 4.6 – Variação da taxa de transporte sólido com o aumento da velocidade de atrito para diferentes teores em água (Hotta et al., 1984).

Existe outro parâmetro que convém adicionar à expressão anterior para a determinação correcta da velocidade de atrito crítica em condições de superfície molhada: a taxa de evaporação (I_w), como se observa na Equação 4.8. Quando a taxa de evaporação é muito elevada, a superfície inicialmente molhada secará rapidamente (Hotta et al., 1984) e, por conseguinte, a velocidade de atrito crítica registada será inferior à que se verifica quando a precipitação excede a evaporação. Assim sendo, desde que se conheça este parâmetro, completa-se a fórmula para o cálculo da velocidade de atrito crítica em condições de superfície molhada.

$$U_{*tw} = A \times \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_a) \times g d}{\rho_a}} + 7.5w \times I_w$$

Equação 4.8 – Velocidade de atrito crítica para superfície húmida com o parâmetro da taxa de evaporação (Hotta et al., 1984).

Onde:

U_{*tw} - velocidade de atrito crítica para condições de superfície húmida (cm/s);

A - constante adimensional empírica com valor de 0.1 para grãos com $d \geq 0.25$ mm, segundo Bagnold, 1954 in Belly, 1964);

ρ_s - massa específica das partículas (2.65 g/cm³ para os grãos de quartzo);

ρ_a - massa específica do ar (0.001225 g/cm³);

g - aceleração gravítica (980 cm/s²);

d - diâmetro médio das partículas (cm);

7.5 - constante de incremento da velocidade (cm/s) aplicado em condições de superfície húmida ($w \leq 8\%$);

w - teor em água (%);

I_w - taxa de evaporação (%).

O parâmetro I_w apresenta valores iguais a 1.0 para, quando a velocidade de atrito excede a velocidade de atrito crítica, para condições de superfície molhada (Hotta *et al.*, 1984).

Na ausência de dados sobre a taxa de evaporação e teor de humidade e de acordo com Hsu & Weggel (2002), que citam experiências realizadas em dunas na Holanda, a capa superficial de areia, em condições de superfície húmida, apresenta sempre valores de $w \leq 2.5 \%$. Desta forma, a Equação 4.7 e Equação 4.8 podem ser reescritas de uma nova forma, mais simples, maximizando o teor em água (Equação 4.9).

$$U_{*tw} = U_{*t} + 18.75$$

Equação 4.9 – Velocidade de atrito crítica (cm/s) para superfície húmida (Hsu & Weggel, 2002).

Existem outros parâmetros, para além dos já apresentados, que condicionam o potencial de transporte e a distribuição vertical do escoamento do vento sobre a superfície.

Entre esses parâmetros encontram-se os factores topográficos. Os três efeitos principais da topografia sobre o vento são: o efeito de abrigo, o efeito da rugosidade e o efeito da orografia (Troen & Lundtang Peterse, 1989).

A presença de obstáculos no terreno produz um efeito de abrigo ao escoamento do vento que é caracterizado por uma diminuição da velocidade do vento na chamada área de sombra. O efeito de abrigo aumenta com o aumento das dimensões do obstáculo e com a diminuição da porosidade do mesmo.

A presença de elementos de rugosidade como a vegetação e o edificado urbano conferem rugosidade à superfície sobre a qual o do vento actua, aumentando a turbulência e modificando o seu escoamento.

Os efeitos da orografia, ou seja, da variação da altura do terreno produzem um aumento da velocidade do vento com o aumento da altura da superfície. Um aumento de 5 % na altura do terreno pode implicar um aumento em 5 % do valor da velocidade média do vento (Troen & Lundtang Peterse, 1989), medido no ponto mais elevado do terreno.

O potencial de transporte do vento é ainda influenciado pelo parâmetro de *fetch* (Bauer *et al.*, 2009). Este parâmetro representa uma distância paralela ao rumo do vento, medida na superfície da praia seca, entre a linha de espraio das ondas e outro ponto a sotavento, geralmente no sopé da duna (Bauer & Davidson Arnott, 2003). Esta distância relaciona-se com o ângulo de ataque do vento e a geometria da praia (comprimento e largura). A variação da distância de *fetch* influencia o potencial de transporte do vento, na medida em que, quanto maior for a superfície da praia disponível para o vento actuar, mais material será transportado e maior será a probabilidade de ocorrer saturação do potencial de transporte.

O presente trabalho segue, como primeira aproximação, o modelo de transporte sólido segundo Bagnold (1954). Assim sendo, as perturbações ao escoamento do vento, identificadas anteriormente, não foram determinadas no âmbito do presente estudo.

4.2 Transporte Sólido Eólico

O transporte sólido eólico depende das características do sedimento e da superfície, como a forma e o tamanho dos grãos, a presença ou ausência de estruturas sedimentares e dos parâmetros do vento, como a velocidade e a velocidade de atrito.

Existem três modos de transporte sólido eólico: saltação, suspensão e reptação (Figura 4.7) e, em qualquer caso, a iniciação e continuidade do transporte implica transferência de energia do ar em movimento para as partículas.

No modo de reptação (arraste, rolamento, tracção), os grãos rolam ou deslizam ao longo da superfície, a favor do vento, sendo esse movimento (que afecta principalmente as partículas de maiores dimensões) consequência do impacto de outro grão ou da acção directa da corrente de ar. Neste modo de transporte os grãos não perdem o contacto com a superfície.

Os grãos transportados em suspensão são levantados da superfície, incorporados na coluna de ar e aí permanecem durante intervalos de tempo suficientemente longos para serem transportados ao longo de grandes distâncias, solidariamente com a massa de ar. Este modo de transporte, que exclui contacto com a superfície, mobiliza essencialmente as partículas mais finas.

As partículas em saltação movimentam-se em contacto intermitente com o solo, segundo uma série de saltos, precedidos ou antecedidos de choques entre partículas.

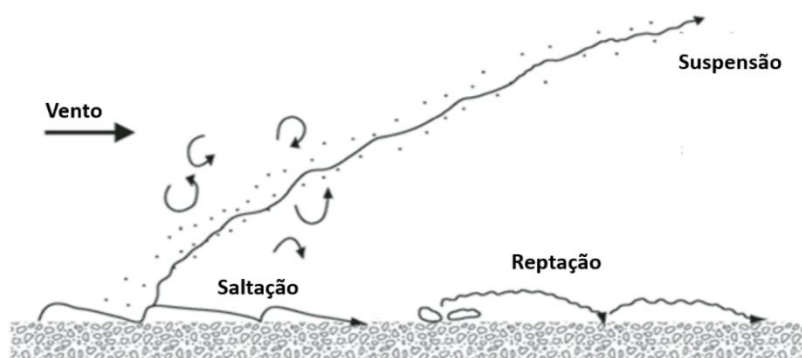


Figura 4.7 – Modos de transporte sólido eólico (adaptado de Lancaster (2009)).

A relação entre a dimensão do grão e o valor da velocidade de atrito condicionam o modo como o sedimento será transportado e a distância horizontal e vertical percorrida num determinado intervalo de tempo. Os grãos com dimensão $< 20 \mu\text{m}$ são geralmente transportados em suspensão e incorporados na coluna de ar, porque em regime de vento muito turbulento, a magnitude da componente vertical da velocidade instantânea do vento excede a magnitude da velocidade de sedimentação. As partículas com dimensões entre 70 e $1000 \mu\text{m}$ são transportadas preferencialmente por saltação cuja deslocação é promovida pelo choque entre as partículas que se encontram em movimento e aquelas que se encontram à superfície; as partículas mais grosseiras, com dimensões $> 500 \mu\text{m}$ são transportadas ao longo da superfície por arraste ou rolamento devido ao processo da reptação onde a componente vertical da velocidade do vento, que actua sobre as partículas, não possui magnitude suficiente para as arrancar da superfície.

A Figura 4.8 representa a influência da razão velocidade de atrito-dimensão média do grão no processo de transporte das partículas. Distinguem-se três domínios que são individualizados pelo aumento da velocidade de atrito. Os valores de velocidade de atrito próximos de zero não promovem qualquer deslocação dos grãos, o transporte tem apenas início a partir de valores superiores a 0.17 m/s, para a saltação, e 0.5 m/s, para a suspensão. Para um mesmo diâmetro médio, o transporte por suspensão requer valores de velocidade de atrito muito superiores aos necessários para promover e manter a saltação.

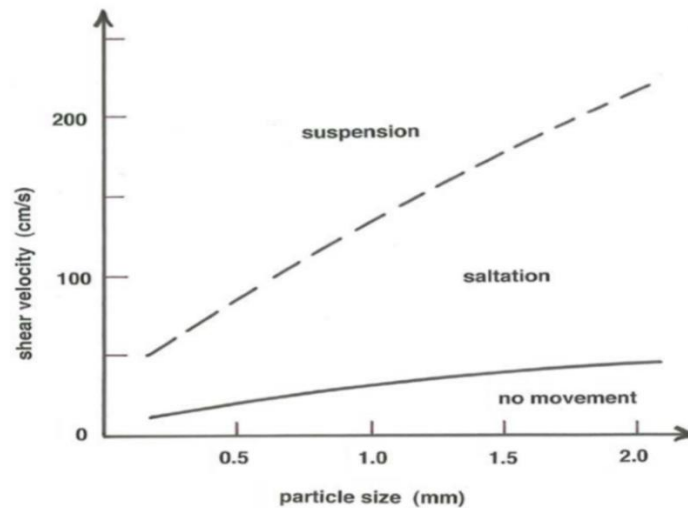


Figura 4.8 – Relação entre a velocidade de atrito crítica e a dimensão média do sedimento como condicionantes do modo de transporte sólido (adaptado de Spies & McEwan (2000)).

Outros autores expressam o limite entre os modos de transporte de partículas através da razão entre a velocidade de sedimentação (w_f) e velocidade de atrito (u_*) (Figura 4.9). O transporte por reptação ocorre quando a velocidade de sedimentação é superior à de atrito, traduzindo-se por valores da razão $w_f/u_* \gg 1$. O transporte por suspensão ocorre, quando a velocidade de sedimentação da partícula é muito pequena face à velocidade de atrito ($w_f/u_* \ll 1$) e o transporte por saltação encontra-se associado a valores de $w_f/u_* \approx 1$ (Pye & Tsoar, 2009).

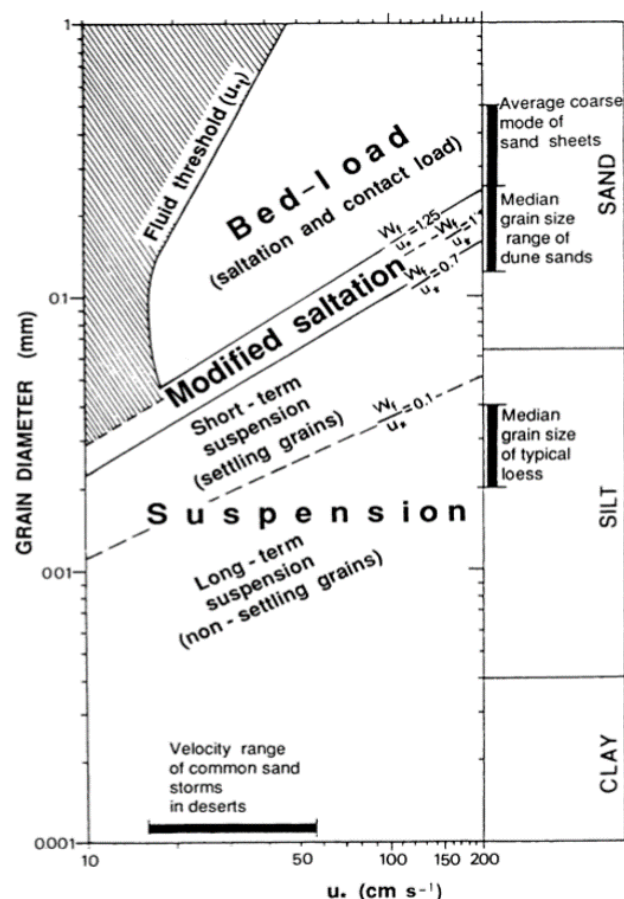


Figura 4.9 – Mecanismos de transporte das partículas (Pye & Tsoar, 2009).

A saltação configura o processo mais comum de transporte eólico de areias em que os grãos são “arrancados” da superfície a uma velocidade superior à velocidade de atrito crítica. Após o início do deslocamento, a partícula efectua uma trajectória ascendente em movimento uniformemente desacelerado, mas associada a um deslocamento horizontal, concordante com o escoamento do vento (Figura 4.10). E, porque incorporam energia do vento, as partículas chegam ao solo com uma energia superior aquela com que iniciaram a sua trajectória. O impacto destes grãos promove o choque entre as partículas, promovendo assim ressalto elástico e a mobilização de outras partículas multiplicando o movimento dos grãos. A altura e o alcance da trajectória que os grãos percorrem no processo de saltação dependem da forma e tamanho do grão, da velocidade de atrito e da natureza da superfície onde ocorre a saltação (Pye & Tsoar, 2009).

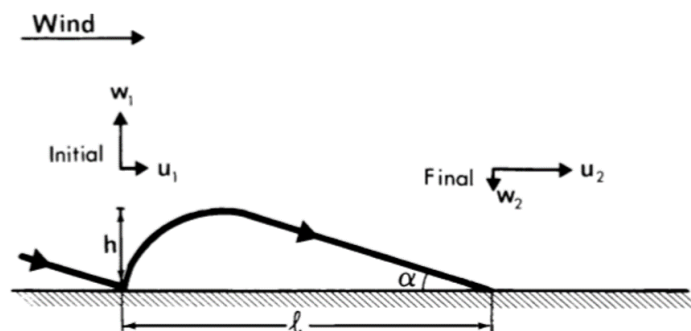


Figura 4.10 – Trajectória balística da saltação dos grãos quando incorporados na coluna de ar (Pye & Tsoar, 2009).

De todos os processos de transporte enunciados anteriormente, a saltação é aquele que promove a movimentação de maior quantidade de partículas da alta praia para a duna e é também o modo de transporte responsável por mais de 90 % de toda a carga sólida transportada pelo vento (Bagnold, 1941).

4.3 Morfologia das Dunas Costeiras

As dunas costeiras são corpos eólicos que se encontram presentes a diferentes latitudes em climas também diferentes (Martínez *et al.*, 2004), que materializam a passagem entre o ambiente costeiro e o ambiente terrestre e apresentam uma grande diversidade ecológica a nível das comunidades animais e vegetais. As dunas costeiras formam-se em ambientes com elevada disponibilidade sedimentar e regimes de ventos que apresentam rumos e magnitudes favoráveis à ocorrência de transporte sólido. A presença de vegetação desempenha um papel importante na estabilização destes corpos.

O material envolvido na formação das dunas provém maioritariamente da alta praia por ser o elemento localizado imediatamente a barlavento destes corpos e por ser actuado menos vezes pelo espraio das ondas, apresentando-se seco durante a maior parte do tempo. Assim sendo, o vento remobiliza mais facilmente as partículas daquela superfície relativamente à face de praia, por exemplo, aumentando significativamente a magnitude do transporte real.

A formação e a manutenção de corpos dunares dependem do rumo e da magnitude dos ventos de mar para terra (*onshore*). O vento deve fluir sobre a superfície com uma intensidade superior ao limiar de arranque de modo a promover o deslocamento dos grãos ao longo da praia e os rumos do transporte dominante devem ser perpendiculares ou oblíquos ao alinhamento das dunas (Seoane *et al.*, 2007).

A presença de vegetação é importante na formação dos primeiros estádios de desenvolvimento dunar e na manutenção dos corpos dunares mais estabilizados. A cada estágio de desenvolvimento dunar corresponde um conjunto de espécies vegetais que são características das diferentes condições do meio: salinidade, pH, humidade, mobilidade de sedimento, entre outras. A vegetação desempenha o papel de interceptar os grãos que são transportados por saltação até à duna, evitando que estes continuem a ser transportados para além desta e incrementa a rugosidade aerodinâmica, diminuindo o fluxo de vento sobre a superfície dunar (Seoane *et al.*, 2007) e, desta forma, promove a sedimentação.

A terminologia utilizada na classificação das dunas costeiras não é consensual entre os vários autores que estudam estes corpos. De seguida, apresentam-se de forma resumida algumas das classificações utilizadas no estudo das dunas costeiras e que serviram de base para a classificação do aparelho dunar de São João da Caparica.

Segundo Hesp (1988) as dunas frontais são depósitos eólicos paralelos à linha de costa e representam uma resposta à interacção dos agentes aerodinâmicos/transporte sedimentar com a presença de vegetação e aos processos costeiros. As dunas costeiras podem ser divididas em dois subtipos: incipientes e estabilizadas (Hesp, 1983, 1984a, b *in* Hesp, 1988). As dunas frontais ou incipientes representam o estágio inicial de formação, apresentando-se condicionadas pelo aporte sedimentar vindo da praia e pela presença de vegetação. A estabilização topográfica e ecológica das formas mais incipientes origina formas mais estabilizadas – dunas frontais estabilizadas. O desenvolvimento morfológico das dunas estabilizadas depende de factores como a disponibilidade de sedimento, o tipo

de vegetação, a relação entre o material acrecionado e erodido, a morfologia inicial da forma incipiente e a frequência e magnitude do forçamento oceanográfico e eólico (Smith, 1960; Ranwell, 1972; Short & Hesp, 1982 *in* Hesp, 1988). O mesmo autor afirma que as dunas frontais estabilizadas a partir de formas incipientes, podem ser divididas em 5 estágios de desenvolvimento com base em factores morfo-ecológicos. O estágio 1 corresponde ao estágio de maior desenvolvimento em que 90 a 100 % da superfície dunar apresenta-se coberta por vegetação e existe uma continuidade linear da topografia da duna. O estágio 5 corresponde à forma dunar frontal mais degradada com apenas 5 a 20 % da superfície vegetada e a duna não apresenta continuidade na sua morfologia devido à presença de múltiplos corredores eólicos (*blowouts*).

A classificação das dunas frontais em função da interacção directa ou indirecta com a praia permite distingui-las em dunas frontais primárias e dunas frontais secundárias (Psuty, 2004). As dunas primárias caracterizam-se por existir um intercâmbio sedimentar directo entre elas e a praia, ocupando uma área que se caracteriza por ocorrer acumulação sedimentar. Consoante as diferentes escalas temporais a duna primária pode aumentar, diminuir ou mesmo manter o seu saldo sedimentar e consequentemente manter-se estável ou progradar, transgredir, em direcção a terra (Psuty, 2004). As dunas secundárias sucedem no espaço às dunas primárias, localizam-se mais para o interior e, por isso, não interagem directamente com a praia. Estas podem ser classificadas em activas ou estáveis caso se mantenham imóveis ou migrem em direcção a terra. No primeiro caso, as dunas secundárias modificam-se a partir da evolução das dunas primárias para formas mais estabilizadas ou através da migração de areia a partir do primeiro cordão dunar devido à presença de corredores de deflacção, morfologias parabólicas ou crescentes. No segundo caso, as dunas secundárias apresentam-se estáveis pela ocorrência de progradação costeira ou pela presença de vegetação bem desenvolvida que confere a estabilização destes elementos.

Com base na classificação de Hesp (1988), a duna de São João da Caparica classifica-se como sendo uma duna frontal formada por um primeiro cordão dunar incipiente e um segundo cordão dunar estabilizado. O cordão dunar incipiente apresenta-se fortemente condicionado pelo aporte sedimentar proveniente da praia, exhibe continuidade em quase toda a sua extensão e contém espécies pioneiras como é o caso do *Elymus farctus*. O cordão dunar estabilizado apresenta características de estabilização típicas dos estádios 3 - 4, com cerca de 20 a 40 % da superfície vegetada, segundo a classificação de Hesp (1988) e exhibe alguma descontinuidade topográfica devido a uma sucessão de elevações e depressões (Figura 4.11).



Figura 4.11 – Duna frontal incipiente (à frente) e da duna frontal estabilizada (atrás), vista de mar para terra.

A duna frontal incipiente evidencia trocas sedimentares directas com a praia, estando o seu crescimento e desenvolvimento condicionado pelo balanço entre o material que chega à duna e aquele que é perdida para a praia. Esta interacção directa com a praia permite classificar este elemento como duna frontal primária, segundo Psuty (2004). A duna frontal estabilizada localiza-se para o interior do primeiro cordão e, por isso, encontra-se afastada da praia não existindo trocas sedimentares com esta nem, actualmente, com o primeiro cordão. Como este elemento não está sujeito a aportes sedimentares, mantém-se estável sem demonstrar transgressão em direcção a terra sendo classificado, segundo Psuty (2004), de duna frontal secundária estável (Figura 4.12).

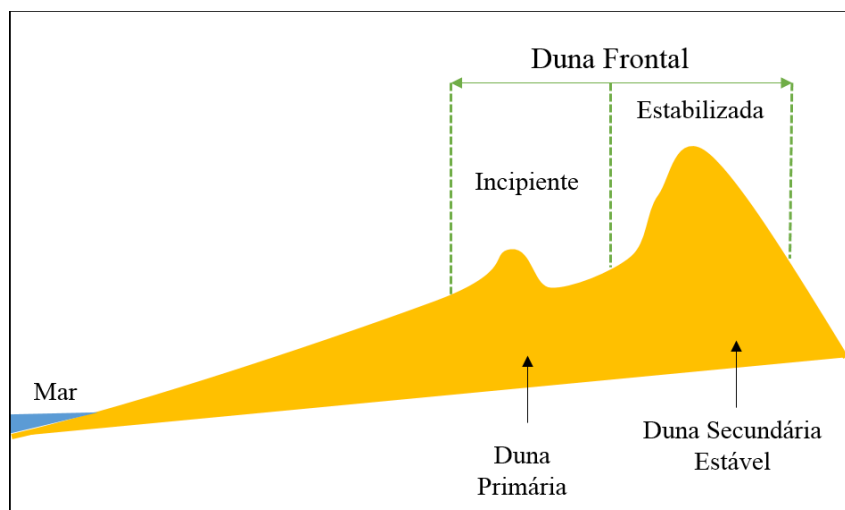


Figura 4.12 – Representação esquemática da morfologia da duna frontal de São João da Caparica ao longo do perfil PF1.

5. Metodologias

5.1 Trabalho de Campo

5.1.1 Levantamento topográfico da duna

A caracterização morfológica do aparelho dunar de São João da Caparica baseou-se em levantamentos topográficos sistemáticos da totalidade da duna (Figura 5.1).

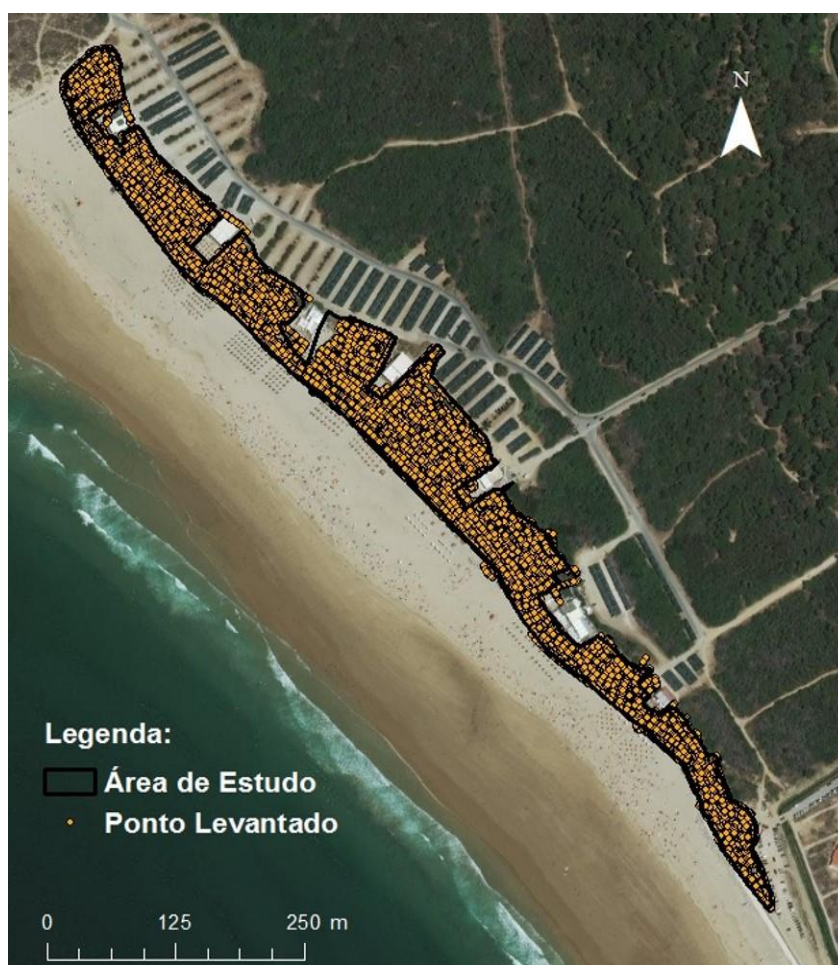


Figura 5.1 – Nuvem de pontos levantados na duna frontal de São João da Caparica (14-09-2016).

A aquisição dos dados foi realizada com recurso a equipamento GNSS (*Global Navigation Satellite System*) do tipo GPS-RTK (*Global Positioning System RealTime Kinematic*), em modo de aquisição automática com resolução de 1 m, utilizando o sistema de coordenadas ETRS89/PT-TM06 (*European Terrestrial Reference System 1989/Portuguese Transverse Mercator Projection de 2006*), de acordo com as recomendações da Directiva INSPIRE (*Infrastructure for Spatial Information in the European Community*). A altimetria refere-se ao nível médio do mar (nmm) (*datum* altimétrico de Cascais de 1938).

A qualidade altimétrica e planimétrica dos pontos levantados durante as campanhas foi verificada através do ponto de referência CC9 (Tabela 5.1) que foi instalado e medido no âmbito do projecto CISML (Silveira *et al.*, 2013).

Tabela 5.1 – Coordenadas do ponto de referência CC9.

Ponto de referência	Easting (m)	Norting (m)	Cota (m) nmm
CC9	-96817.25	-112426.58	6.36

As campanhas de aquisição dos dados realizaram-se entre Fevereiro de 2015 e Novembro de 2016 num total de 8 campanhas (Tabela 5.2). Estes levantamentos integraram projectos de monitorização do litoral realizados pelo Departamento de Geologia da FCUL e pelo Instituto Dom Luiz (IDL), para a APA e para a CMA. A autora integrou a equipa de campo a partir de Junho de 2016.

Tabela 5.2 – Datas das campanhas do levantamento da duna.

Campanha	Data das campanhas
1	06-02-2015
2	20-05-2015
3	18-12-2015
4	01-02-2016
5	05-03-2016
6	09-06-2016
7	14-09-2016
8	16-11-2016

Para além do levantamento da duna, foram ainda levantados, em algumas campanhas, 2 perfis topográficos transversais à duna: perfil PF1 e perfil PF2 (Tabela 5.3).

Tabela 5.3 – Datas das campanhas do levantamento dos perfis PF1 e PF2.

Campanha	Data das campanhas
6	09-06-2016
-	21-07-2016 ²
7	30-09-2016
8	17-11-2016

Os perfis PF1 e PF2 foram levantados perto dos equipamentos de praia *Leblon* e *Kon Tiki*, respectivamente (Figura 5.2). A localização e designação dos equipamentos de praia existentes ao longo da duna encontram-se em anexo (Anexo 1). Os perfis tiveram início no tardoz da duna e prolongaram-se pela praia até alcançar a cota do nível médio do mar. Estes perfis serviram para localizar os pontos de amostragem de sedimento superficial e para a interpolação de Modelos Digitais de Terreno (MDT).

² No âmbito da presente dissertação procedeu-se ao levantamento dos perfis topográficos PF1 e PF2, na data indicada, mas os mesmos não vieram a ser determinantes na obtenção de quaisquer resultados.

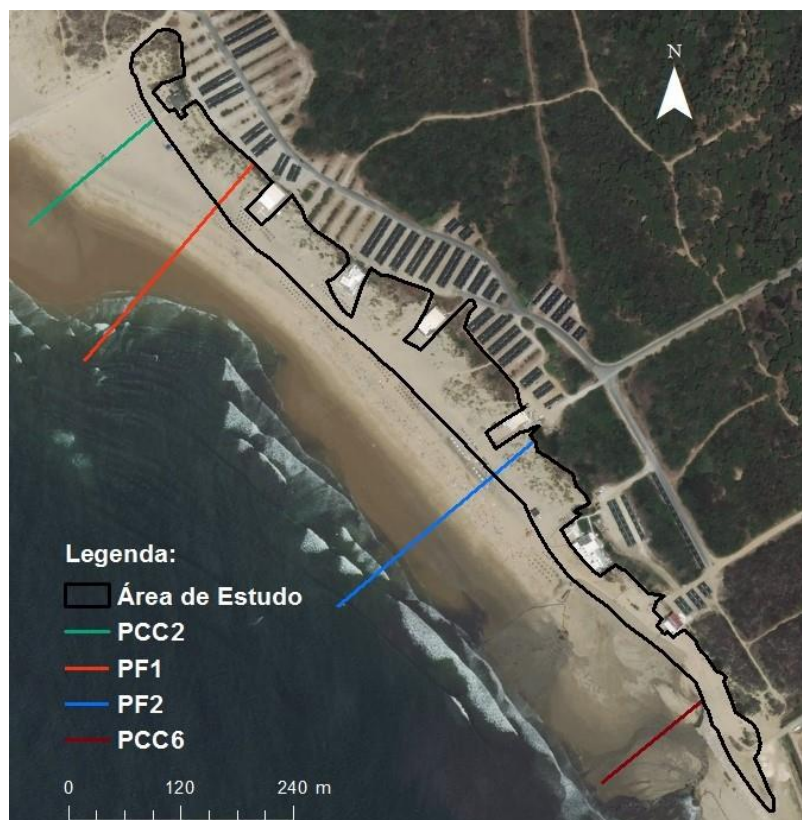


Figura 5.2 – Localização dos perfis de controlo e amostragem PF1 e PF2 e dos perfis de amostragem PCC2 e PCC6.

5.1.2 Estacas de controlo

No perfil PF1 foram enterradas duas estacas de plástico com anilhas, deixando cerca de 0.20 m a descoberto, acima da superfície topográfica: a primeira estaca foi colocada no topo da forma eólica (E1) e a segunda na aba sotavento da mesma (E2) (Figura 5.3).

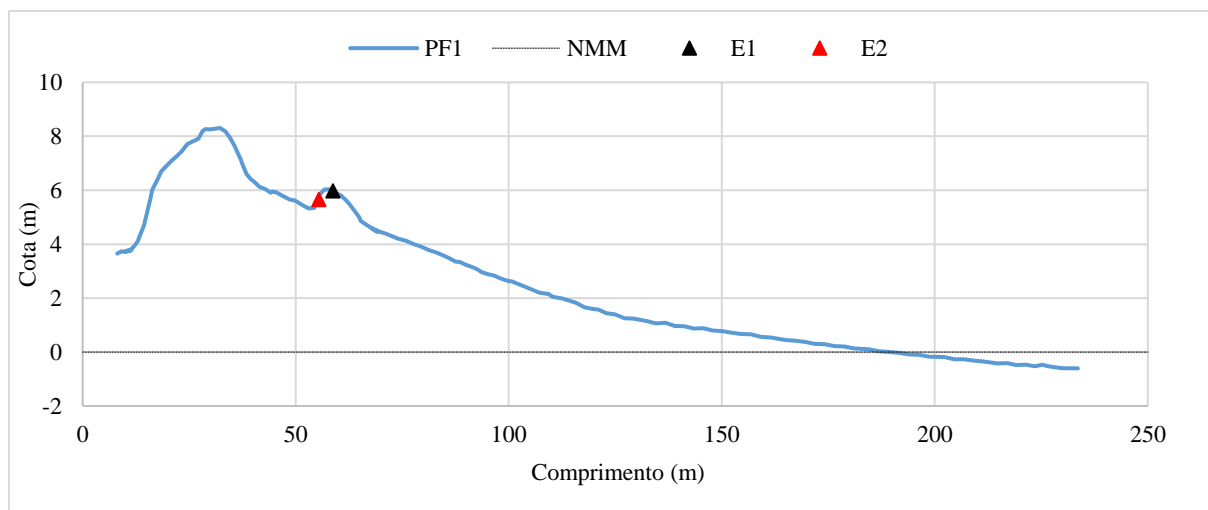


Figura 5.3 – Localização das estacas E1 e E2 no perfil PF1.

A colocação das estacas e anilhas tinha como objectivo monitorizar e registar episódios de erosão e acumulação a uma escala espacial mais detalhada. As estacas foram inseridas durante a campanha 6, e na campanha 7 verificou-se que tinham sido removidas do local de estudo, decidindo-se assim abandonar a experiência.

5.1.3 Sedimentos

A recolha de amostras de sedimento foi realizada na duna, na berma e na face de praia ao longo de quatro perfis transversais: PCC2, PF1, PF2 e PCC6 (Figura 5.2).

A amostragem decorreu entre Março de 2011 e Setembro de 2016 num total de 23 campanhas (Tabela 5.4), foram recolhidas um total de 94 amostras (16 na duna, 38 na berma e 40 na face de praia).

Tabela 5.4 – Data e localização da amostragem de sedimento.

Data das campanhas	Local de amostragem: Berma (B); Face de Praia (F); Duna (D)											
	PCC2			PCC6			PF1			PF2		
	D	B	F	D	B	F	D	B	F	D	B	F
19-03-2011		X	X			X						
04-06-2011		X	X		X	X						
12-09-2011	X	X	X		X	X						
29-11-2011	X	X	X		X	X						
12-03-2012	X	X			X	X						
06-06-2012		X	X		X	X						
04-09-2012	X	X	X		X	X						
02-12-2012	X	X	X		X	X						
01-03-2013		X	X		X	X						
11-06-2013	X	X	X		X	X						
09-12-2013	X	X	X		X	X						
08-01-2014	X		X									
16-04-2014			X			X						
12-09-2014		X	X			X						
09-12-2014			X			X						
06-02-2015			X			X						
23-05-2015			X			X						
14-10-2015		X	X		X	X						
07-03-2016		X	X		X	X						
07-06-2016		X	X		X	X						
09-06-2016							X	X		X	X	
16-09-2016		X	X		X	X						
30-09-2016							X	X		X	X	

Nos perfis PF1 e PF2 a distribuição das amostras foi efectuada do seguinte modo: duas amostras na duna (primeira e segunda célula de retenção sedimentar) e duas amostras na berma da praia (berma alta e berma baixa) (Figura 5.4 e Figura 5.5).

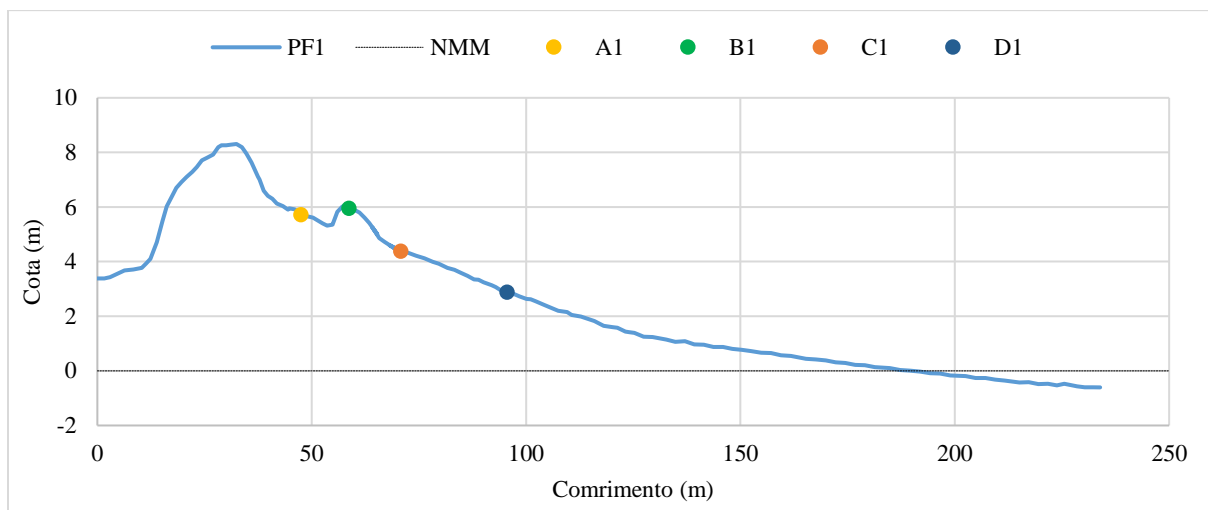


Figura 5.4 – Localização dos pontos de amostragem no perfil PF1.

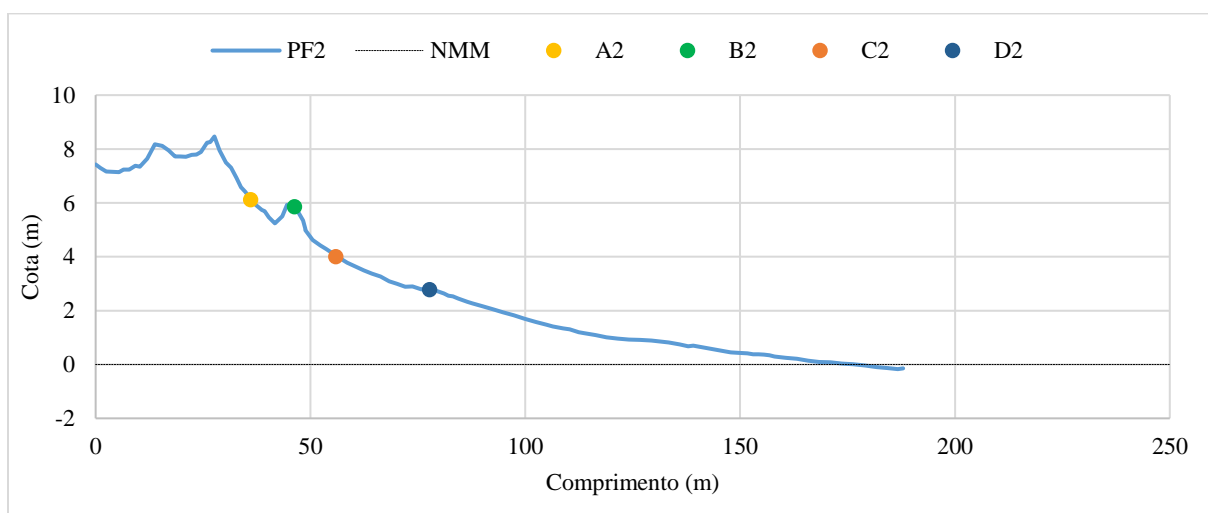


Figura 5.5 – Localização dos pontos de amostragem no perfil PF2.

Amostrou-se a camada superficial de sedimento, em que se encontra registado o último evento deposicional. As amostras foram acondicionadas em sacos de plástico devidamente identificados com a data, o perfil correspondente e o ponto de amostragem no perfil.

5.2 Trabalho de Laboratório

5.2.1 Granulometria de sedimentos

O tratamento das amostras de sedimento, todas arenosas, assim como os ensaios sedimentológicos foram realizados no laboratório de Processos Costeiros do Departamento de Geologia da FCUL.

As amostras de areia recolhidas no campo foram lavadas para retirar os sais solúveis, sendo posteriormente colocadas na estufa a 60° C durante cerca de 72 h de modo a garantir a completa secagem da areia. Depois de secas, as amostras foram quarteadas para se obter uma quantidade de aproximadamente 0.1 kg, necessária à realização do ensaio granulométrico.

Uma toma de areia quarteada foi pesada e colocada numa coluna de crivos com malha de dimensões variáveis entre -2 ϕ e 4 ϕ com intervalos de 0.5 ϕ . A coluna foi posteriormente colocada num agitador mecânico vibrando a uma frequência de 60 Hz durante 15 min.

Em seguida, pesou-se a fracção da amostra que ficou retida em cada crivo, de cujo somatório se obteve o peso final. A diferença entre o peso inicial e o peso final foi sempre inferior a 1 %.

Os dados relativos aos pesos e classe dimensional de cada fracção granulométrica foram introduzidos no *software* GRADISTAT e a partir do método gráfico (Folk & Ward, 1957) obtiveram-se os parâmetros característicos da distribuição granulométrica, como a média gráfica (MZ ϕ), desvio padrão gráfico inclusivo ($\sigma_1\phi$), assimetria gráfica inclusiva (SKI) e curtose gráfica (K σ).

5.3 Trabalho de Gabinete

5.3.1 Processamento de dados de campo

Os dados topográficos recolhidos no campo foram processados e analisados com recurso aos *softwares ArcGIS®* versão 10.4 e ao *Microsoft Excel 2016* para a geração de MDT e à interpolação dos perfis PF1, PF2, PFA, PFB e PFC.

De seguida, apresenta-se a metodologia utilizada no processamento dos dados de campo.

Geração de MDT

1. Geração de uma TIN (*Triangulated Irregular Network*); foi definindo uma distância máxima de triangulação para o limite externo da TIN de 100 m (*Delineate TIN*);
2. Geração de um MDT por campanha; transformação da TIN em MDT (Interpolação: *Natural Neighbors*; Tipo: *Float*; Píxel: 1 m; Extensão (*extent*): utilização de um polígono para definir o domínio espacial dos MDT e garantir a coincidência dos mesmos pixéis em todos os modelos);
3. Recorte dos MDT por um polígono (área de estudo) que corresponde à área da duna excluindo a superfície ocupada pelos equipamentos de praia.

Como alguns dos levantamentos realizados não apresentavam uma boa cobertura da área total da duna, nomeadamente no tardoz e na extremidade sul da duna, bem como no interior de algumas células de retenção, foi necessário acrescentar alguns pontos levantados em campanhas anteriores (pontos auxiliares) de modo a diminuir a imprecisão associada aos processos de interpolação (Tabela 5.5). O número de pontos auxiliares utilizados para colmatar as lacunas foi sempre inferior a 5 % da totalidade dos pontos usados na geração de cada MDT.

Tabela 5.5 – Resumo dos pontos utilizados na geração dos MDT.

Campanha	Pontos (levantados)	Pontos (auxiliares)	Total	Pontos (auxiliares) (%)
1	11025	213	11238	2
2	9226	0	9226	0
3	10827	267	11094	2
4	9874	558	10432	5
5	11444	268	11712	2
6	11898	330	12228	3
7	12530	444	12974	3
8	13399	469	13868	3

Construção de mapas de diferenças de elevação

Os mapas das diferenças de elevação, entre campanhas, foram construídos através da subtração de MDT dois a dois, utilizando a ferramenta *Raster Calculator*. Definiu-se um intervalo de incerteza altimétrica associada aos levantamentos de ± 0.10 m (centrados no valor zero) e, em conformidade, os mapas classificam como não significativas (a incolor) as variações altimétricas de magnitude inferior a 0.20 m.

Determinação da retenção volumétrica

O cálculo da retenção volumétrica na duna em cada levantamento (definido como o volume acima de um plano horizontal de referência à cota +2m (nmm) e limitado pelo polígono da área de estudo) foi determinado através dos MDT relativos a cada campanha com recurso à ferramenta *Surface Volume*.

Determinação dos volumes de erosão e acreção

Os volumes de erosão e acreção foram determinados através da ferramenta *Cut & Fill* que a partir da subtração de dois MDT gera um *raster* com a magnitude das diferenças de elevação entre os modelos e uma tabela de atributos, a partir da qual facilmente se obtém o volume e a área total da acreção e de erosão. Na elaboração do balanço sedimentar conservaram-se os valores de todas as células dos MDT em comparação, e a respectiva magnitude obtém-se por subtração dos volumes de acreção e erosão na totalidade da duna.

Interpolação de perfis

Os perfis PFA, PFB, PFC, PF1 e PF2 foram interpolados a partir dos MDT, com recurso à ferramenta *Extract Multi Values to Points*. Os perfis PFA, PFB e PFC serviram para controlo da evolução morfológica da duna entre a primeira e a última campanha de monitorização. Os perfis PF1 e PF2 serviram para aferir os efeitos da interpolação na geração dos MDT conseguida por comparação de resultados medidos e interpolados. A magnitude das diferenças foi quantificada através do Erro Médio Quadrático (EMQ) (Equação 5.1).

$$EMQ = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{x=1}^n (y_x - \hat{y}_x)^2}$$

Equação 5.1 – Fórmula do erro médio quadrático.

Onde:

EMQ - erro médio quadrático (m);

n - número de observações;

y_x - valor real (m);

\hat{y}_x - valor estimado (m).

5.3.2 Natureza e processamento de dados de vento

O processamento dos dados de vento foi realizado recorrendo aos *softwares* *MATLAB® R2016a* e *Microsoft Excel 2016*, para detectar e eliminar erros associados a falhas de observação, construir diagramas vectoriais e quantificar a magnitude do transporte sólido eólico potencial

A caracterização do regime de ventos da praia de São João da Caparica foi realizada com base em dados de vento de duas naturezas: medidos e modelados. Os locais de aquisição dos dados, as séries temporais e os parâmetros medidos apresentam-se na Tabela 5.6 e na Figura 5.6.

Tabela 5.6 – Dados de vento processados neste trabalho.

Fonte	Natureza dos dados	Localização	Intervalo temporal	Parâmetros
Modelo Numérico	Modelados (Série horária)	Malha 9 x 9 km Lat: 38.39380° Long: - 9.15174°	1989-2012	<ul style="list-style-type: none"> • Componentes u10 e v10 da velocidade, 10 m acima do solo; • Precipitação.
Instituto Dom Luiz (IDL)	Medidos (Série horária)	Observatório Meteorológico Lat: 38.42594° Long: - 9.08567°	1979-2016	<ul style="list-style-type: none"> • Rumo; • Velocidade, 10 m acima do solo; • Precipitação.
Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA)	Medidos (Série horária)	Estação 21.3 Lat: 38.61698° Long: - 9.2128°	2002-2012	<ul style="list-style-type: none"> • Rumo; • Velocidade, 10 m acima do solo; • Precipitação.



Figura 5.6 – Localização dos pontos de modelação e medição das séries de dados de vento.

Os dados modelados resultaram da aplicação do Modelo Numérico de Circulação Weather Research and Forecast (WRF) (versão 3.1) à fachada oeste da Ibéria. Este modelo foi desenvolvido por Skamarock *et al.*, (2008) e adaptado por Soares *et al.*, (2012). O modelo foi corrido sobre uma malha regular 9 km de lado. A série de dados corresponde à célula que contém a duna frontal de São João da Caparica (coordenadas do ponto seleccionado indicadas na Tabela 5.6 e sua localização na Figura 5.6 à esquerda). Obteve-se assim uma série horária de 23 anos, compreendida entre as 00:30 de 01-01-1989 e as 24:00 de 31-12-2012. O modelo forneceu as componentes em longitude e latitude da intensidade média horária do vento a 10 m acima do solo, a partir das quais se determinou o rumo e a intensidade resultante e ainda a precipitação horária.

A primeira série de dados medida corresponde a medições no anemómetro do observatório meteorológico do IDL, em Lisboa. Contém dados horários de 37 anos, com início às 00:30 de 01-01-1979 e término às 09:30 de 02-12-2016. A série contém valores direccionais e de intensidade do vento 10 m acima do solo e valores horários da precipitação sinóptica observada no mesmo local.

A segunda série corresponde a medições horárias no anemómetro da estação da Praia da Rainha, que integra a rede de estações do IPMA. Abrange 10 anos, com início às 00:30 de 01-01-2002 e fim às 24:00 de 31-12-2012. A série contém valores de rumo e intensidade média do vento 10 m acima do solo e ainda dados sinópticos da precipitação local.

Os dados de vento foram tratados, utilizando a seguinte metodologia:

1. Detecção e eliminação das observações correspondentes a erros ou falhas de registo dos anemómetros e pluviómetros;
2. Definição do intervalo de 11 anos (2001 a 2011) para comparação do regime de ventos simulado pelo modelo numérico com o regime medido na estação do INAG localizada no Monte da Caparica, no mesmo intervalo de tempo;
3. Definição de um intervalo de 11 anos (2002 a 2012), comum às séries obtidas a partir do modelo numérico e das estações do IDL e da Praia da Rainha (IPMA), para efeitos de comparação dos resultados, quer no que respeita ao vento total que no que respeita ao vento eficaz (velocidade superior a 7.7 m/s, 10 m acima do solo);
4. Construção de diagramas vectoriais que ilustram a distribuição dos ventos totais e eficazes do modelo numérico e das estações do IDL e da Praia da Rainha, no período 2002-2012;
5. Determinação de taxas de transporte sólido para condições de superfície seca e húmida, com base nos dados de vento do modelo numérico (período 1989-2012), para avaliar a importância da inclusão do teor em água nas estimativas de transporte sólido;
6. Determinação das taxas de transporte sólido eólico potencial e estimativa do balanço sedimentar da duna de São João da Caparica a partir da série de dados do IDL para o intervalo contemporâneo da monitorização da evolução morfológica da duna (Fevereiro de 2015 a Novembro de 2016);
7. Comparação dos resultados dos balanços sedimentares determinados a partir dos MDT e do processamento dos dados de vento.

O balanço sedimentar da duna de São João da Caparica construído a partir de estimativas de transporte sólido eólico partiu da determinação das taxas de transporte, de acordo com o descrito acima, nos pontos 4.1 Processos Eólicos e 4.2 Transporte Sólido Eólico, utilizando os parâmetros descritos na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Parâmetros utilizados na determinação das taxas de transporte sólido eólico

Parâmetros		Unidades	Valor
Velocidade à distância Z do solo	U	m/s	-
Velocidade de atrito	U_*	m/s	-
Distância ao solo	Z	m	10
Ordenada do ponto focal	Z'	mm	2.87
Abcissa do ponto focal	U'	milhas/h	0.00574
Massa específica das partículas	ρ_s	g/cm ³	2.65
Massa específica do ar	ρ_a	g/cm ³	0.001225
Velocidade de atrito crítica	U_{*t}	m/s	0.247
Constante adimensional	A	-	0.1
Aceleração gravítica	g	cm/s ²	980
Diâmetro médio das partículas	d	mm	0.287
Diâmetro <i>standard</i> das partículas	D	mm	0.25
Taxa de transporte sólido	q	g/cm.s	-
Constante adimensional	C	-	1.8

Considera-se a fronteira materializada pelo sopé da duna do lado de terra sempre fechada, não havendo assim, transporte de massa da duna para terra, nem de terra para a duna. Considerou-se a fronteira entre a praia e a duna sempre aberta permitindo trocas de areia entre a praia e a duna. Assim, admite-se que o sedimento que chega à duna provém apenas da praia e que a duna também só perde areia para a praia, não se contabilizando o contributo através das restantes fronteiras laterais, a norte e a sul. A estimativa do transporte total através da fronteira entre a praia e a duna considerou um comprimento de 1 km para esta fronteira. Uma vez que as equações de transporte sólido produzem resultados em termos de massa por unidade de comprimento perpendicular ao rumo do vento, foi necessário corrigir estes valores para incluir o efeito de obliquidade do vento relativamente à orientação da duna (N30°W) e aplicou-se também uma constante de conversão massa-volume de 1.59 ton/m³.

6. Resultados e Discussão

6.1 Sedimentos

A caracterização textural do sedimento recolhido na praia e na duna de São João da Caparica consistiu na determinação e análise dos parâmetros estatísticos (M_Z , σ_I , SKI e $K\sigma$) da curva de distribuição granulométrica das areias da duna, berma e face de praia. A listagem de todos os resultados obtidos nas amostras estudadas, assim como a classificação seguida, encontra-se em anexo (Anexo 2). A análise da Figura 6.1 à Figura 6.8, em que se representa a projecção destes parâmetros dois a dois, permite caracterizar o sedimento de cada domínio morfossedimentar, quanto ao diâmetro médio dos grãos (M_Z), calibração (σ_I), assimetria (SKI) e curtose ($K\sigma$) e comparar texturalmente todos os domínios amostrados.

O sedimento de berma é formado por areia média a fina, com diâmetro médio variável entre 1.1 ϕ e 2.4 ϕ e valor médio de 1.8 ϕ . Trata-se de areia bem calibrada a moderadamente bem calibrada, com valores de desvio padrão variáveis entre 0.62 ϕ e 0.31 ϕ e média de 0.47 ϕ (Figura 6.1).

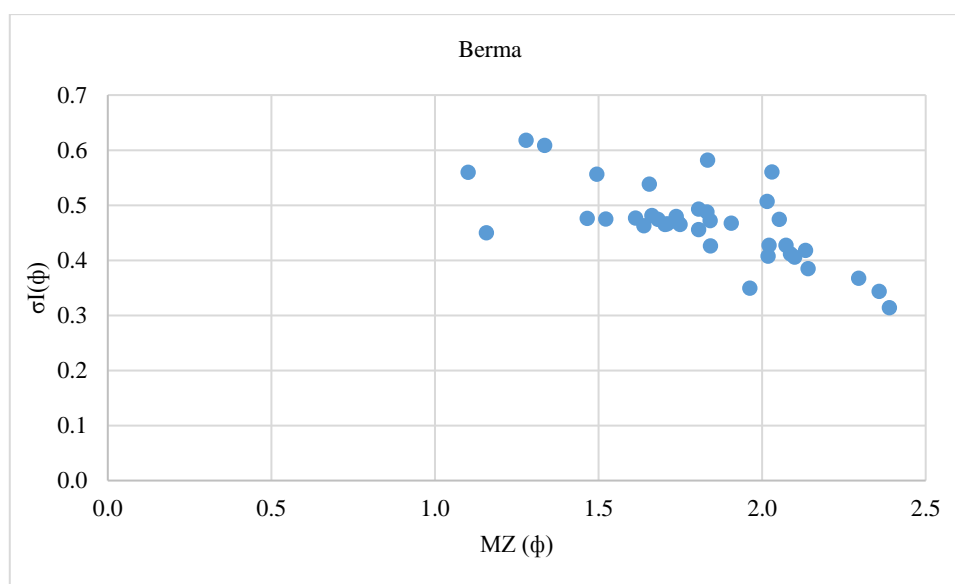


Figura 6.1 – Caracterização textural do sedimento da berma.

Em relação à assimetria, o sedimento de berma apresenta curvas de distribuição preferencialmente simétricas (42 % das amostras), a assimetria positiva no sentido dos finos é rara (apenas 3 casos) e 23 % das amostras exibem assimetria negativa, no sentido dos grosseiros. Num e outro caso o índice SKI não ultrapassa 0.2 e -0.2, respectivamente, com valor médio de -0.04 (Figura 6.2).

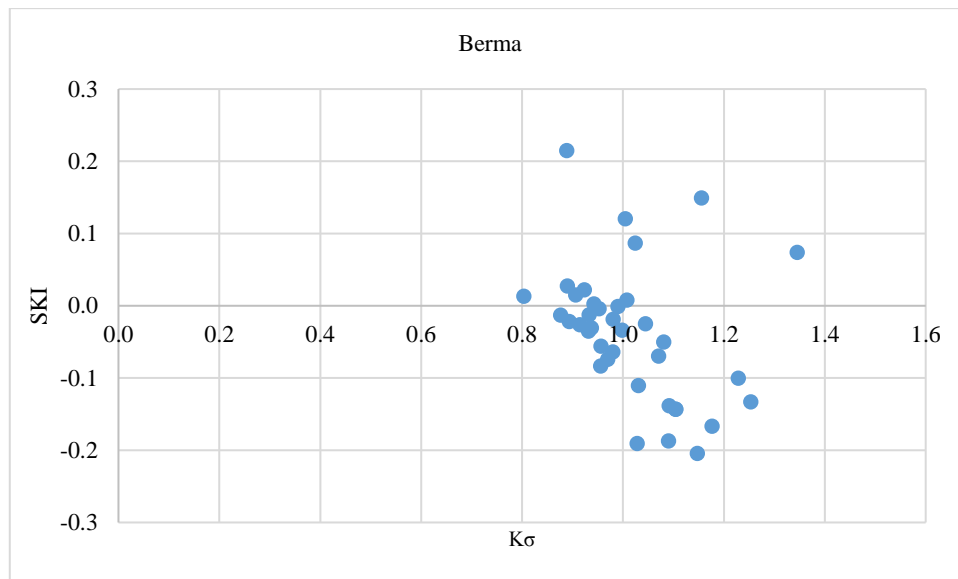


Figura 6.2 – Caracterização textural do sedimento da berma.

A análise textural das amostras de face de praia indica tratar-se de areia média a fina, com diâmetro médio variável entre 1.5 ϕ e 2.4 ϕ e valor médio de 1.9 ϕ . O sedimento apresenta-se bem calibrado a moderadamente bem calibrado com valores de desvio padrão no intervalo de 0.61 ϕ a 0.33 ϕ e valor médio de 0.45 ϕ (Figura 6.3).

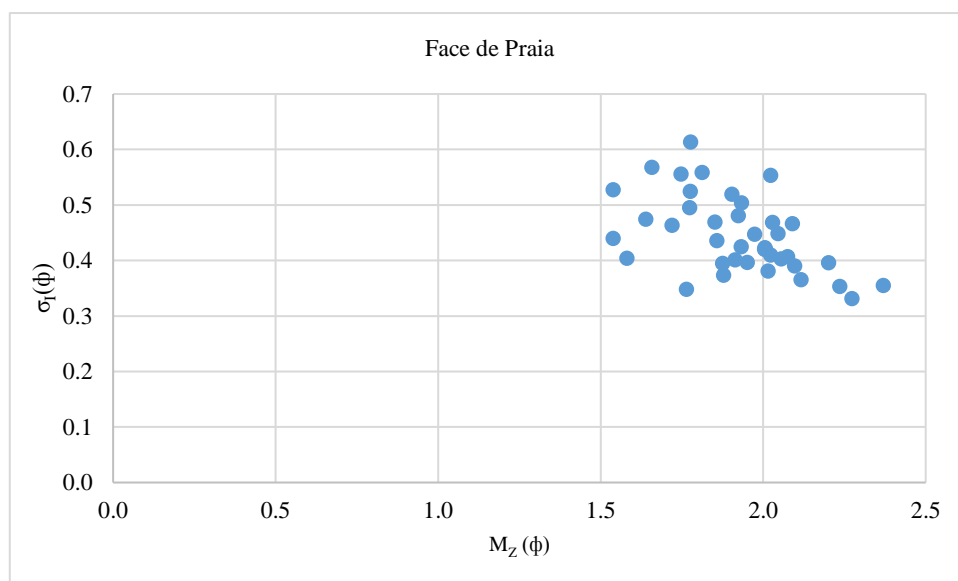


Figura 6.3 – Caracterização textural do sedimento da face de praia.

Em relação à assimetria trata-se de um sedimento com distribuição simétrica (em 70 % dos casos) a assimétrica no sentido dos finos (em apenas 3 casos) e dos grosseiros em 11 casos. Os valores de SKI variam entre 0.15 e -0.20 e o valor médio é de -0.04 (Figura 6.4).

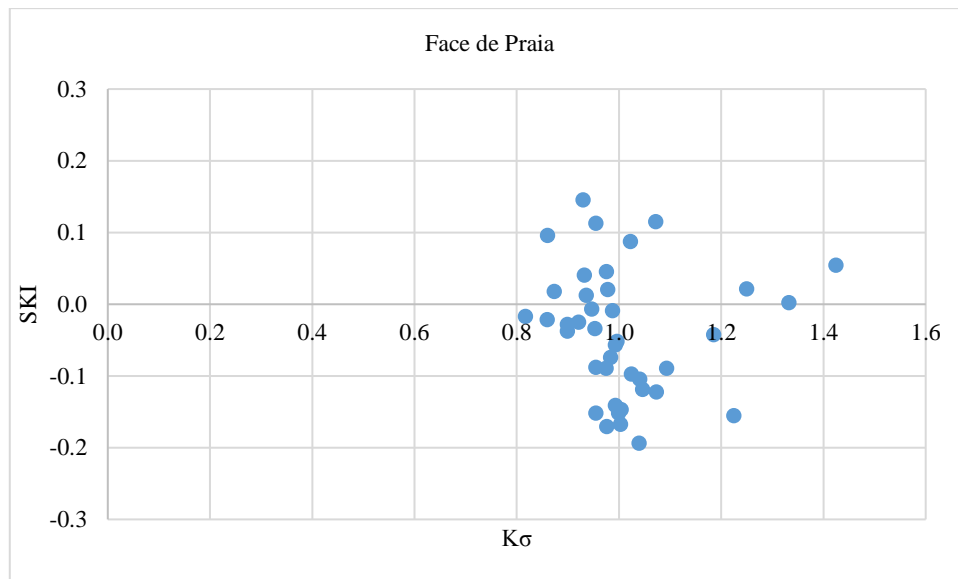


Figura 6.4 – Caracterização textural do sedimento da face de praia.

A análise textural das areias de duna mostra tratar-se de areia média a fina, com diâmetro médio variável entre 1.6 ϕ e 2.3 ϕ e valor médio de 1.9 ϕ . Trata-se de um sedimento bem calibrado a moderadamente bem calibrado com valores de desvio padrão de 0.65 ϕ e 0.37 ϕ com médio de 0.50 ϕ (Figura 6.5).

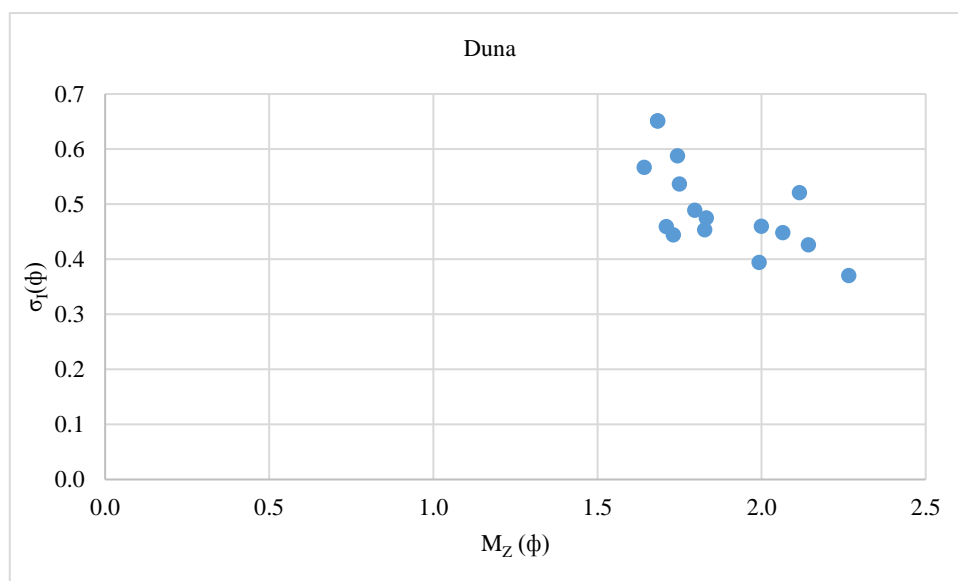


Figura 6.5 – Caracterização textural do sedimento da duna.

Quanto à assimetria, o sedimento apresenta uma distribuição simétrica a assimétrica no sentido dos grosseiros, apresentando valores de 0.04 a -0.2 e valor médio de -0.05 (Figura 6.6).

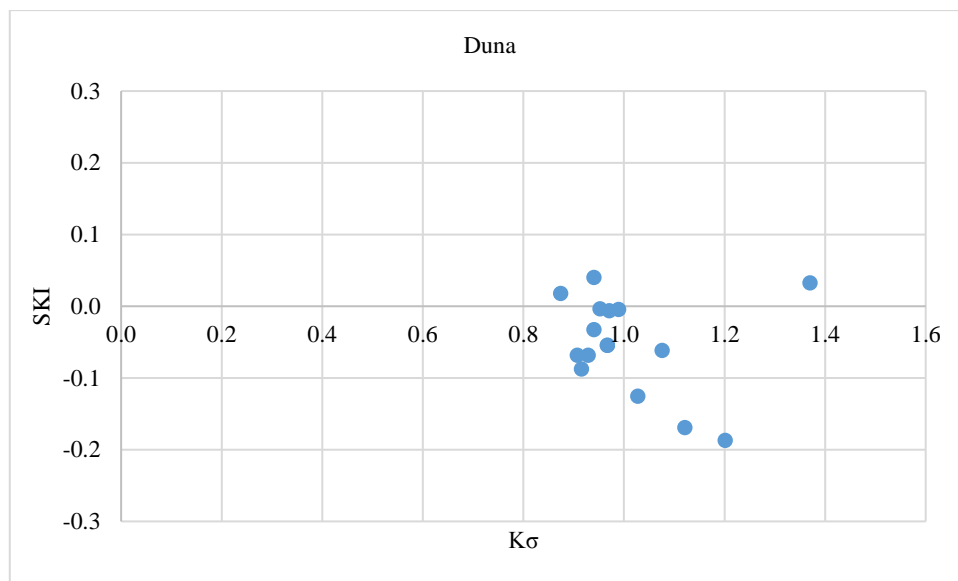


Figura 6.6 – Caracterização textural do sedimento da duna.

A Figura 6.7 e a Figura 6.8 permitem comparar directamente as areias amostradas nos diferentes domínios de praia do ponto de vista textural.

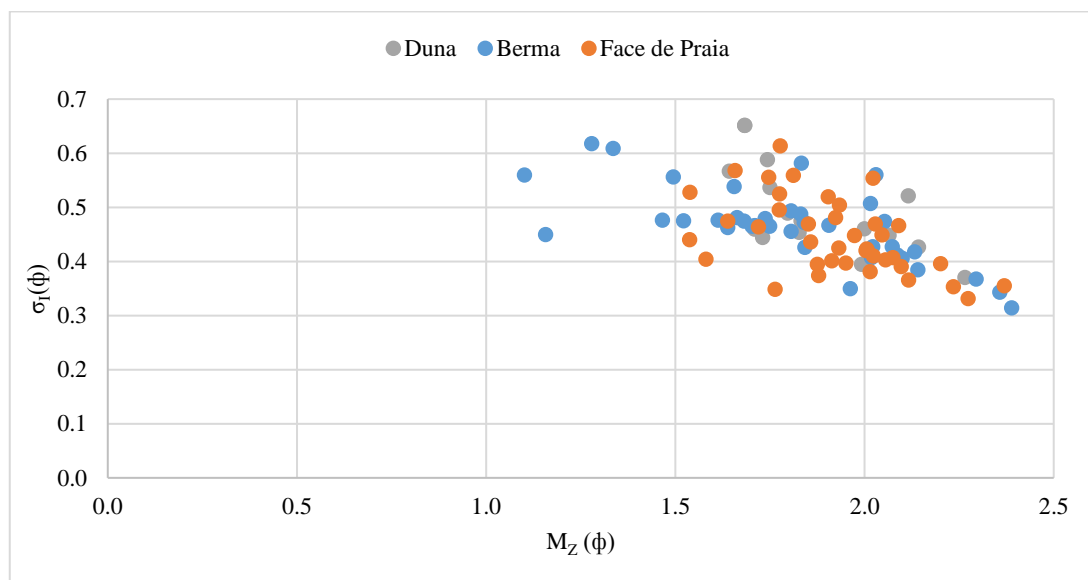


Figura 6.7 – Caracterização textural das areias de duna, berma e face de praia.

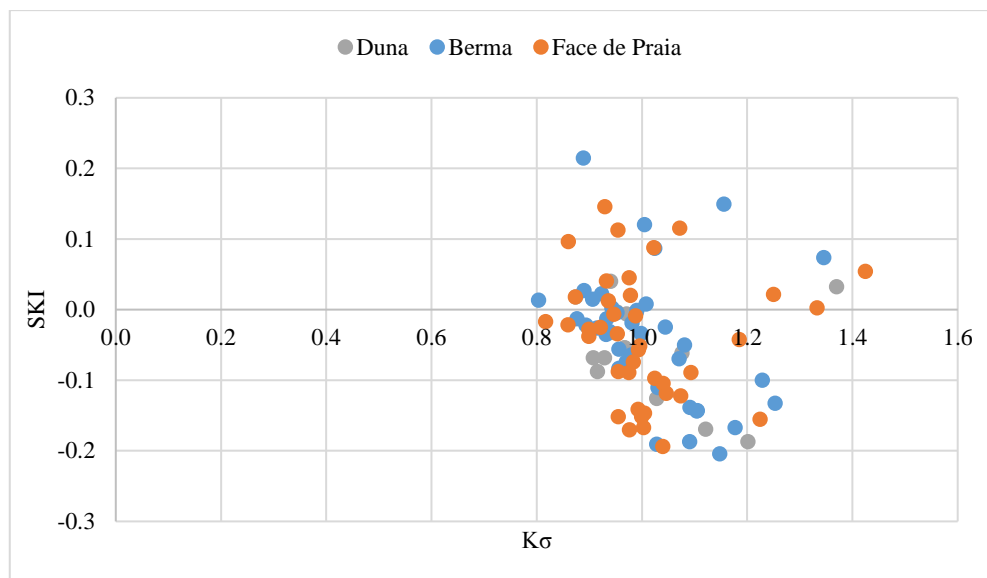


Figura 6.8 – Caracterização textural das areias de duna, berma e face de praia.

Os resultados indicam que os três domínios amostrados contêm areias texturalmente semelhantes. Todos os domínios são constituídos por areias de grão médio a fino e essencialmente bem calibradas, com distribuição preferencialmente simétrica a assimétrica no sentido dos grosseiros. As areias da berma apresentam uma fracção granulométrica mais grosseira face aos restantes domínios. Este resultado pode ser explicado pelo facto de que, quando o vento transporta as partículas da berma até à duna, remobiliza mais facilmente os grãos de menor dimensão, deixando para trás, na praia, as partículas mais grosseiras.

A Figura 6.7 ilustra uma tendência de melhoria da calibragem com a diminuição do diâmetro médio e ainda uma grande semelhança na assinatura textural das areias da duna e da face de praia, apesar de as partículas terem sido sujeitas a agentes de transporte diferentes.

Os resultados texturais obtidos neste trabalho para as areias da duna e praia de São João da Caparica são semelhantes aos obtidos por outros autores: Freire (1989), Teixeira (1990) e Diogo *et al.*, 2013, para a mesma área de estudo (Tabela 6.1).

Tabela 6.1 – Caracterização textural das areias de duna e praia segundo vários autores.

Freire, 1989		Teixeira, 1990	Diogo <i>et al.</i> , 2013	
Areias de praia	Areias de duna	Areias de praia	Areias de praia	Areias de duna
Areia média a fina (Mz: 1.6 - 2.1 ϕ)	Areia fina (Mz: 1.8 - 2.1 ϕ)	Areia fina (Mz: 1.99 - 2.31 ϕ)	Areia média a fina (Mz: 1.75 - 1.80 ϕ)	Areia fina (Mz: 1.80 - 2.0 ϕ)
Muito bem calibradas a moderadamente bem calibradas (σ : 0.26 - 0.60 ϕ)	Bem calibradas (σ : 0.40 - 0.44 ϕ)	Muito bem calibradas a moderadamente bem calibradas (σ : 0.25 - 0.55 ϕ)	-	-
Simétrica a assimétrica no sentido dos grosseiros (SKI: 0.10 - -0.16)	Simétrica a assimétrica no sentido dos grosseiros (SKI: 0.07 - -0.13)	Assimétrica no sentido dos grosseiros	-	-

Segundo Teixeira (1990) existem relações texturais entre as areias de praia e de duna e estas últimas também apresentavam valores de desvio padrão maiores com o aumento da granularidade. Estes resultados sugerem que o espectro granulométrico das areias de praia e duna na região estudada se mantiveram invariantes nos últimos 20 anos.

As areias de berma e duna, aqui estudadas, são formadas por grãos com uma dimensão média centrada em 1.8 ϕ e 1.9 ϕ , respectivamente, ou seja, aproximadamente 2 ϕ (0.25 mm). Esta é a dimensão média dos grãos utilizada por diversos autores em experiências de túnel de vento na determinação de parâmetros de rugosidade, velocidade de atrito e taxas de transporte sólido eólico. Tal significa que os sedimentos considerados neste estudo são semelhantes do ponto de vista dimensional aos que foram utilizados na dedução das equações empíricas de predição do transporte sólido, apresentadas anteriormente.

6.2 Morfologia e evolução morfológica

6.2.1 Morfologia

A comparação entre os perfis PF1 e PF2 levantados e interpolados (Anexo 3) permitiu avaliar a incerteza associada ao método da interpolação espacial através da determinação do EMQ. Os resultados obtidos (Tabela 6.2) apresentam, no geral, valores inferiores a 0.20 m, à excepção do valor determinado para o perfil PF2 na campanha 7. A magnitude do erro encontra-se compreendida no intervalo de incerteza altimétrica associada ao método de levantamento topográfico pelo que, no contexto deste trabalho, considera-se este valor aceitável. Refere-se que os perfis da campanha 7 foram levantados 15 dias após o levantamento integral da duna, sendo que neste caso, a magnitude do EMQ pode reflectir não só a incerteza associada à interpolação do MDT mas também a dinâmica do sistema costeiro.

Tabela 6.2 – Valores de EMQ.

Perfis	EMQ (m)		
	Campanha 6	Campanha 7	Campanha 8
PF1	0.15	0.12	0.10
PF2	0.19	0.23	0.18

O MDT referente à campanha 1 (Figura 6.9) e os perfis PFA, PFB e PFC interpolados a partir deste modelo (Figura 6.11 e Figura 6.13) permitiram caracterizar a morfologia do aparelho dunar de São João da Caparica após a instalação das paliçadas de retenção sedimentar. Em Fevereiro de 2015, existia um único edifício dunar a que correspondem cotas de 8 m nos perfis PFA e PFB e cotas de 9 m no perfil PFC, não se observando acumulação significativa junto da primeira fiada de paliçadas. Assim, considera-se este levantamento como representativo da situação inicial, em que a morfologia da duna ainda não reflectia os efeitos da intervenção do projecto ReDuna.

A comparação do MDT inicial (campanha 1) com o relativo à campanha final (campanha 8), (Figura 6.10) e dos perfis interpolados a partir dos dois modelos (Figura 6.11 à Figura 6.13) permite observar a evolução morfológica que ocorreu na duna após os 21 meses de estudo. Constatou-se que a alteração morfológica mais relevante consistiu na acreção de um novo cordão dunar primário, junto das paliçadas de retenção e que se apresenta à cota 5 m, nos três perfis de controlo. Em contraste, o segundo edifício dunar não exibiu alterações significativas durante este intervalo de tempo.

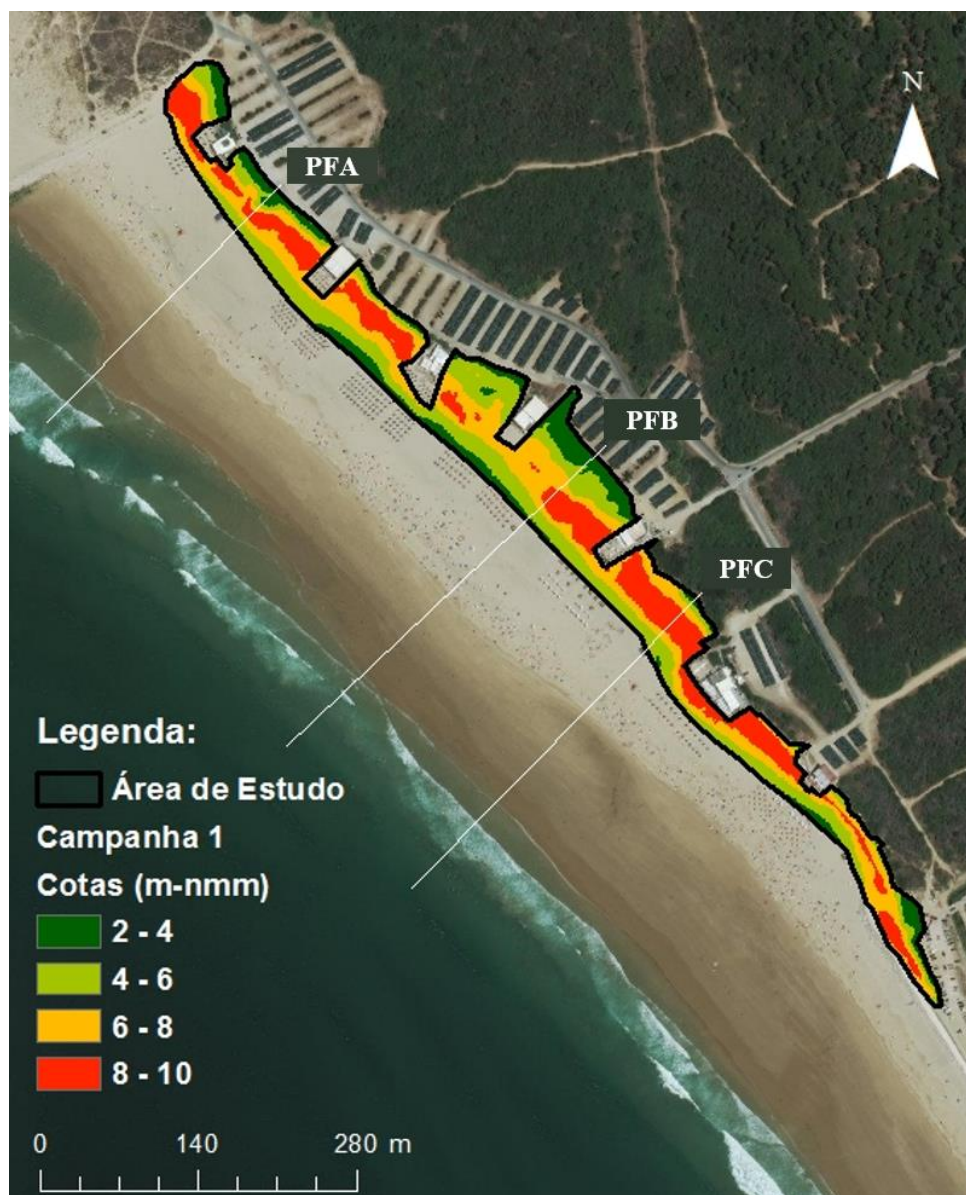


Figura 6.9 – Modelo digital de terreno obtido da campanha 1 e perfis de controlo PFA, PFB e PFC (Fevereiro de 2015).



Figura 6.10 – Modelo digital de terreno obtido da campanha 8 e perfis de controlo PFA, PFB e PFC (Novembro de 2016).

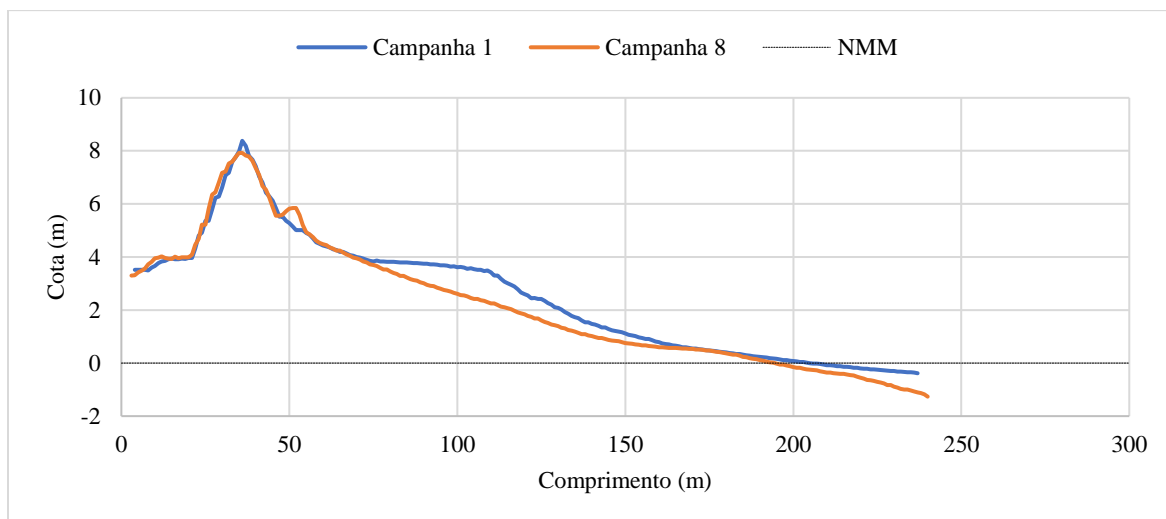


Figura 6.11 – Perfil PFA interpolado a partir do MDT das campanhas 1 e 8.

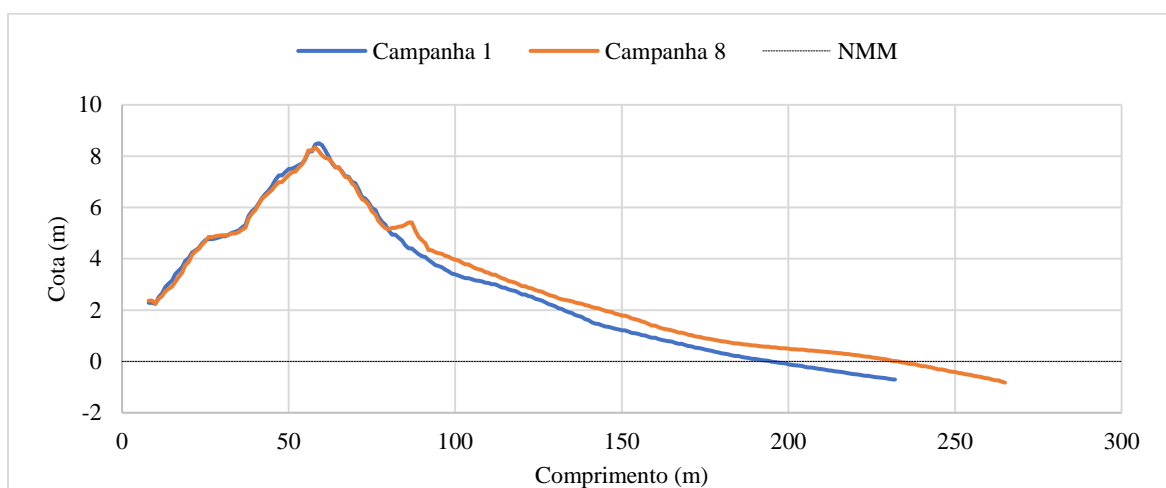


Figura 6.12 – Perfil PFB interpolado a partir do MDT das campanhas 1 e 8.

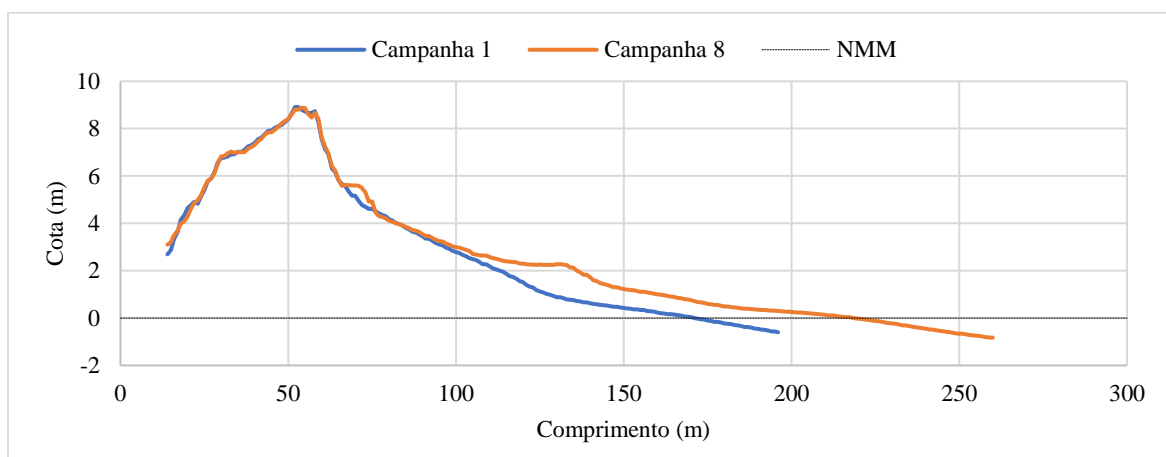


Figura 6.13 – Perfil PFC interpolado a partir do MDT das campanhas 1 e 8.

A comparação entre os MDT da primeira e última campanha de monitorização apenas ilustram as alterações morfológicas entre o levantamento mais antigo e o mais recente, mas não informa sobre a variabilidade morfológica entre estes dois momentos. A realização de campanhas intermédias permitiu caracterizar a evolução morfológica da duna frontal de São João da Caparica a uma escala temporal mais pequena (sazonal), encontrando-se os respectivos MDT reunidos em anexo (Anexo 4). As diferenças morfológicas verificadas entre os MDT consecutivos foram de pequena magnitude, salientando-se apenas que no MDT referente à campanha 4 (Anexo 4.3) observa-se que a totalidade do cordão dunar primário alcançou uma cota apical superior à da campanha 3 (Anexo 4.2).

6.2.2 Distribuição espacial das diferenças de elevação

As figuras abaixo (Figura 6.14 à Figura 6.23) apresentam os mapas com as diferenças de elevação entre campanhas consecutivas e entre a primeira e última campanha realizada.

A Figura 6.14 representa as diferenças de elevação observadas entre as campanhas 1 e 2. A distribuição das erosões e acumulações é descontínua ao longo da duna, registrando-se acumulação significativa no extremo SSE e em algumas células de retenção localizadas no tardo da duna. As perdas com maior expressão foram registradas em duas zonas do tardo da duna e numa sucessão de células de retenção localizadas junto ao equipamento de praia *Pé Nu*. Observa-se ainda uma extensão significativa, caracterizada por evolução com magnitude dentro do intervalo de incerteza altimétrica, interpretada como indicando estabilidade.



Figura 6.14 – Mapa de diferenças de elevação entre os MDT das campanhas 1 e 2 (Fevereiro e Maio de 2015).

As diferenças de elevação registadas entre as campanhas 2 e 3 (Figura 6.15) mostram a existência de uma faixa de acumulação praticamente contínua, que corresponde ao crescimento do novo cordão dunar primário. Ocorreram, também, acumulações significativas em células de retenção sedimentar junto ao equipamento de praia *Pé Nú* e em alguns locais no tardo da duna. A distribuição espacial das erosões é descontínua e apresenta maior expressão num conjunto de células de retenção localizadas junto ao *Bicho D'água* e ainda em algumas zonas do tardo da duna junto ao equipamento de praia *Sunset*.



Figura 6.15 – Mapa de diferenças de elevação entre os MDT das campanhas 2 e 3 (Maio e Dezembro de 2015).

Entre as campanhas 3 e 4 (Figura 6.16) observa-se que a faixa de acumulação que materializa o cordão dunar primário, exibe maior largura e continuidade espacial. Verifica-se, igualmente, acumulação significativa nas células de retenção sedimentar situadas perto dos equipamentos de praia *Bicho D'água* e *Sea Salt & Pepper*. As evidências de erosão distribuem-se descontinuamente ao longo da duna e continuam a ser registadas áreas estáveis, nomeadamente no extremo SSE da duna.



Figura 6.16 – Mapa de diferenças de elevação entre os MDT das campanhas 3 e 4 (Dezembro de 2015 e Fevereiro de 2016).

As diferenças de elevação registadas entre as campanhas 4 e 5 (Figura 6.17) revelam que a duna sofreu um episódio erosivo significativo, em magnitude e expressão espacial. Praticamente toda a extensão da duna foi afectada, com excepção da área localizada a norte do equipamento de praia *Leblon*, que não apresenta indícios de perdas sedimentares relevantes. As manchas indicadoras de acumulação encontram-se dispersas pelo aparelho dunar, com maior expressão no tardo da duna e em alguns troços da duna primária. A faixa de acumulação, observada anteriormente em coincidência com o cordão dunar primário, perdeu expressão entre estas campanhas, apresentando-se agora maioritariamente com sinal de estabilidade.



Figura 6.17 – Mapa de diferenças de elevação entre os MDT das campanhas 4 e 5 (Fevereiro e Março de 2016).

Entre as campanhas 5 e 6 (Figura 6.18) é visível a predominância da acumulação e destaca-se o reaparecimento da faixa de acumulação que materializa o cordão dunar primário que apresenta novamente largura e continuidade espacial longitudinal. Verifica-se também a ocorrência de acumulação entre os equipamentos de praia *Leblon* e *Bicho D' água* e no tardo da duna perto do *Sea Salt & Pepper*. As manchas indicativas de erosão apresentam-se distribuídas ao longo do aparelho dunar secundário e são espacialmente descontínuas.



Figura 6.18 – Mapa de diferenças de elevação entre os MDT das campanhas 5 e 6 (Março e Junho de 2016).

As diferenças de elevação registadas entre as campanhas 6 e 7 (Figura 6.19) evidenciam uma distribuição descontínua das erosões e acumulações ao longo de toda a extensão da duna. As acumulações com maior expressão ocorrem no tardoz da duna, junto aos equipamentos de praia *Sunset* e *Leblon*. As áreas incolores correspondentes a estabilidade, também ganharam expressão neste intervalo de comparação.



Figura 6.19 – Mapa de diferenças de elevação entre os MDT das campanhas 6 e 7 (Junho e Setembro de 2016).

A Figura 6.20 apresenta as diferenças de elevação entre as campanhas 7 e 8, que indicam novo episódio erosivo, embora com expressão espacial menos pronunciada. A região entre os equipamentos de praia *Sunset* e *Pé Nú* apresenta uma dominância clara de erosão, enquanto a norte e a sul desta região, observa-se essencialmente estabilidade. Verifica-se ainda acumulação localizada no tardoz da duna, nomeadamente entre os equipamentos de praia *Leblon* e *Sunset*.



Figura 6.20 – Mapa de diferenças de elevação entre os MDT das campanhas 7 e 8 (Setembro e Novembro de 2016).

A Figura 6.21 ilustra as diferenças de elevação registadas no primeiro ano de monitorização, decorrido entre as campanhas 1 e 4. É possível verificar a dominância da acumulação sobre a erosão em toda a extensão da duna. As manchas correspondente à erosão são espacialmente descontínuas e de dimensão reduzida. Em oposição, destaca-se a presença da faixa contínua de acumulação significativa que materializa o cordão dunar primário e da ocorrência de acumulação no extremo SSE da duna. A norte do *Leblon* a duna apresenta um comportamento maioritariamente estável.



Figura 6.21 – Mapa de diferenças de elevação entre os MDT das campanhas 1 e 4 (Fevereiro de 2015 e Fevereiro de 2016).

A Figura 6.22 representa as diferenças de elevação registadas no segundo ano de monitorização decorrido entre as campanhas 4 e 8. Verifica-se uma clara dominância da erosão face à acumulação, que afectou toda a extensão da duna. A faixa de acumulação evidente no ano anterior perde expressão em continuidade e largura, apesar de ainda se observarem algumas manchas correspondendo a acumulações ao longo do cordão dunar primário.



Figura 6.22 – Mapa de diferenças de elevação entre os MDT das campanhas 4 e 8 (Fevereiro e Novembro de 2016).

Na Figura 6.23 observam-se as diferenças de elevação registadas no período total de monitorização (campanhas 1 e 8). A faixa de acumulação que materializa o crescimento do cordão dunar primário apresenta largura e continuidade significativas, ao longo de toda a extensão da duna. Observam-se, também, acumulações importantes no tardoz e no extremo SSE da duna. As manchas correspondentes a erosões encontram-se dispersas, maioritariamente, ao longo de todo o aparelho dunar secundário.



Figura 6.23 – Mapa de diferenças de elevação entre os MDT das campanhas 1 e 8 (Fevereiro de 2015 e Novembro de 2016).

6.2.3 Variações volumétricas e balanço sedimentar

O volume da duna acima da cota +2 m (nmm), assim como os valores das acreções, erosões e resultante líquida (balanço sedimentar) determinados para os intervalos de tempo entre campanhas encontram-se sumariados na Tabela 6.3 e na Tabela 6.4.

Tabela 6.3 – Estimativa de balanço sedimentar da duna entre campanhas consecutivas de monitorização.

Campanhas	Volume (m ³)	Acreção (m ³)	Erosão (m ³)	Balanço sedimentar (m ³)
1	183169	4778	2008	2770
2	185828			
3	188258	4100	1866	2234
4	190929	5542	2250	3292
5	187097	1343	5981	-4638
6	189443	4492	1872	2620
7	189833	3246	2506	739
8	187321	2112	4017	-1905

As ferramentas utilizadas no cálculo do volume total de cada MDT e dos volumes de acreção/erosão entre campanhas sucessivas foram as mesmas, como foi descrito no subcapítulo 5.3.1 Processamento de dados de campo. Nesse sentido, os valores de balanço sedimentar apresentados na tabela anterior são ligeiramente diferentes dos valores estimados a partir da subtracção directa dos volumes totais de cada MDT.

Tabela 6.4 – Estimativa de balanço sedimentar da duna entre campanhas de monitorização.

Campanhas	Acreção (m ³)	Erosão (m ³)	Balanço sedimentar (m ³)
1 – 4	9770	1505	8265
4 – 8	2581	5680	-3100
1 – 8	7856	2793	5063

A Figura 6.24 ilustra a variação dos ganhos e perdas sedimentares registados na duna durante o período de monitorização e a Figura 6.25 representa a variação do balanço sedimentar e da retenção volumétrica da duna para o mesmo intervalo de tempo.

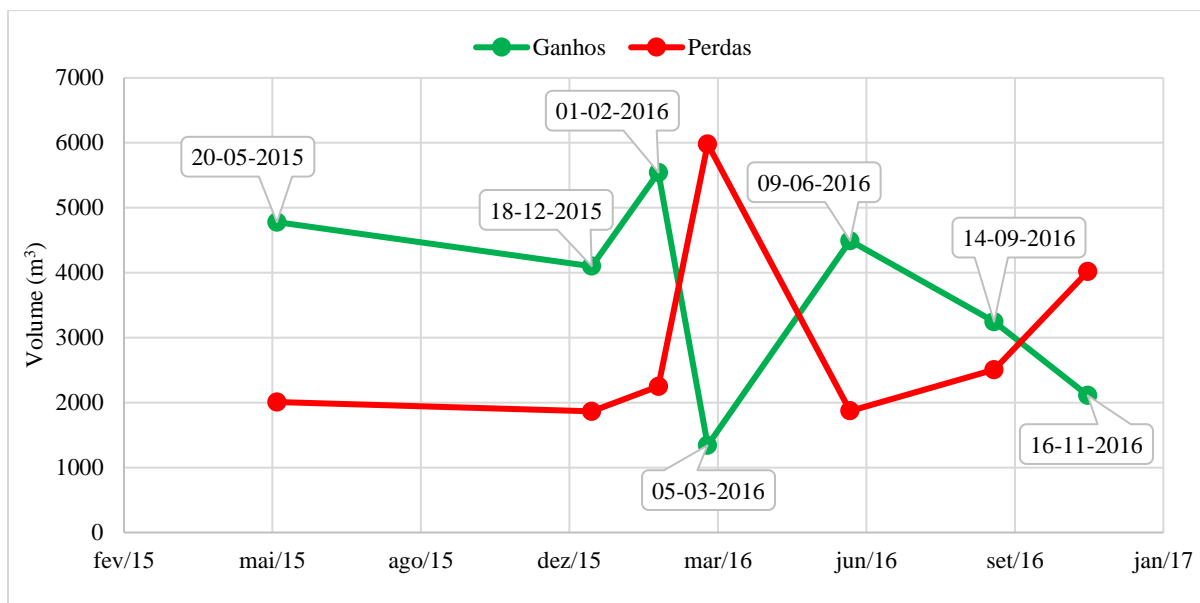


Figura 6.24 – Variação dos ganhos e perdas sedimentares registados na duna.

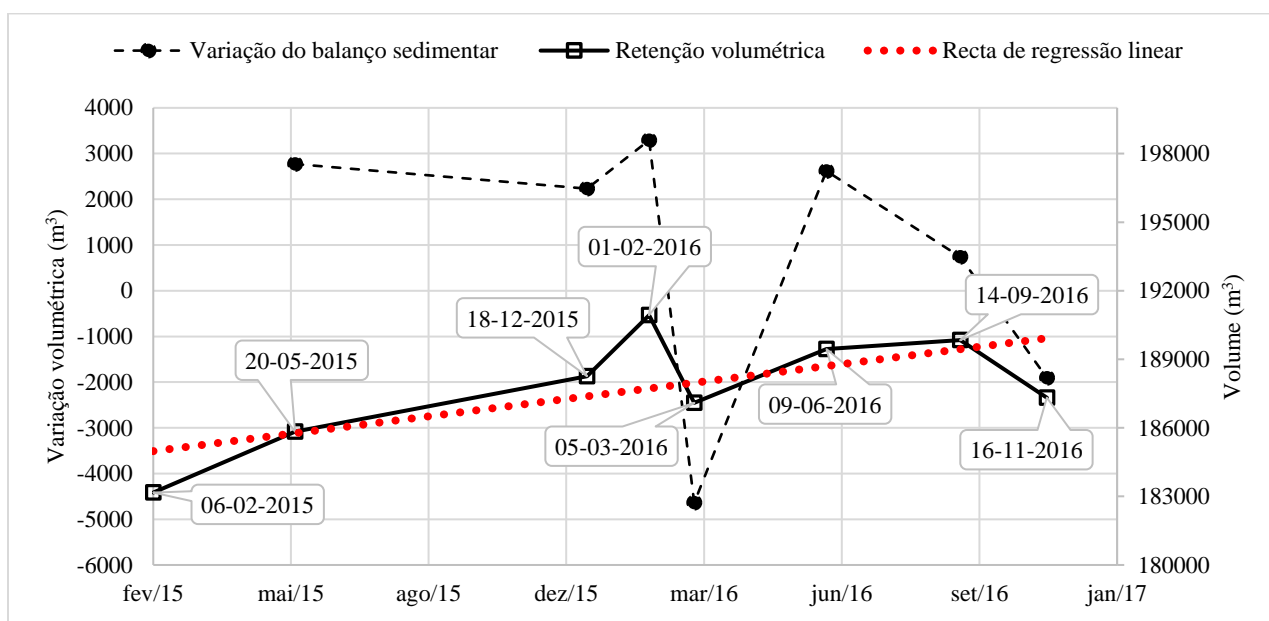


Figura 6.25 – Variação do balanço sedimentar e da retenção volumétrica registados na duna.

$$y = 7.61x - 135050$$

Equação 6.1 – Equação reduzida da recta de tendência.

Durante os 21 meses de monitorização, a duna evidenciou tendência global para acumulação sedimentar. Esta tendência tende a camuflar a variabilidade morfológica significativa, com expressão no espaço e tempo, que ocorreu entre campanhas (Figura 6.14 à Figura 6.20). O ajuste de uma regressão linear (Equação 6.1) aos dados da retenção volumétrica da Figura 6.25 indica que a taxa média de acumulação na duna foi reduzida e na ordem da 8 m³/dia.

A duna primária de São João da Caparica configura uma duna frontal incipiente, cujo crescimento ainda se apresenta muito dependente da presença das paliçadas de retenção e da vegetação (pouco desenvolvida). Este corpo dunar apresenta envergadura reduzida e variações importantes na magnitude das acreções e erosões. As evoluções morfológicas sazonais observadas ao longo do cordão dunar primário, que incluem também episódios erosivos, devem-se à sua localização em ambientes de *stress* elevado, induzido quer pelos ventos (*onshore* e *offshore*), quer pela acção do espraio das ondas. A reduzida robustez deste cordão sugere que ele será incapaz de resistir ao impacto de tempestades violentas, que poderão gerar erosão significativa ou a sua destruição.

A estabilidade apresentada pela duna secundária, quando se comparam os levantamentos da primeira e da última campanha, deve-se, em primeiro lugar, ao facto de este elemento morfológico configurar um cordão dunar mais interno, encontrando-se abrigado da acção das ondas e dos ventos intensos vindos de mar, apresentando-se assim mais protegido dos principais factores de *stress*. A presença de vegetação mais desenvolvida e diversificada e que cobre uma maior área da superfície dunar, em relação ao primeiro cordão, contribui para a fixação das areias, evitando que o sedimento seja mobilizado da duna. Durante os 21 meses de monitorização, a duna secundária não apresentou acumulações significativas e tal deveu-se ao facto de a maior parte do sedimento transportado da praia para a duna ficar acumulado no primeiro cordão, não alcançando o segundo cordão. O corpo dunar secundário só irá apresentar evidências de acumulação quando ocorrer a saturação do efeito de obstáculo e a diminuição da retenção sedimentar na duna primária, possibilitando o transporte de areia para o interior desta. Tal só será possível com o soterramento das paliçadas de retenção mais externas e na ausência de vegetação. Nestas condições o segundo cordão dunar deixará de se apresentar estável e passará a ter um comportamento activo.

Durante o primeiro ano de monitorização, decorrido entre as campanhas 1 e 4 (Fevereiro de 2015 e Fevereiro de 2016), a duna apresentou um balanço sedimentar positivo na ordem de 8300 m³. Este valor sugere que as paliçadas interceptaram as partículas transportadas da praia para a duna, promovendo a acumulação de sedimento junto às estruturas de retenção e a presença das diversas espécies vegetais permitiu a fixação das partículas, minimizando a sua mobilização para fora do corpo dunar. A maior acreção ocorreu ao longo do cordão dunar primário em concordância com a primeira fiada de paliçadas, visível através da expressão cartográfica (Figura 6.21) e das observações de campo.

No decorrer dos 9 meses seguintes, entre as campanhas 4 e 8 (Fevereiro e Novembro de 2016) a duna sofreu perdas sedimentares significativas (Figura 6.22) e na ordem de -3100 m³. De seguida, avançam-se três hipóteses que podem explicar a ocorrência de episódios erosivos que podem estar na génese dos valores de balanço sedimentar negativos. A primeira hipótese consiste na ocorrência de ventos intensos de terra, que prevaleçam sobre os ventos de mar em tempo e magnitude, capazes de induzir o transporte de areias da duna para a praia, provocando perda sedimentar por parte da duna. A segunda hipótese consiste na ocorrência de erosão do sopé da duna pelo espraio das ondas (preferencialmente de tempestade) em condições de preia mar de águas vivas capazes de erodir e escarpar a base da duna primária ou lhe reduzir a cota. A primeira hipótese será testada mais à frente através do processamento de dados de vento, e as observações de campo e os dados disponíveis não permitem confirmar a segunda hipótese. A terceira hipótese prende-se com a existência de erros nos levantamentos das campanhas de Fevereiro e/ou Março, não colocando totalmente de parte a ocorrência de episódios erosivos e de acreção, mas, não tão significativos em termos de volume sedimentar. Esta última hipótese sugerida pelas observações, qualitativas, de campo não pode ser, contudo, testada em tempo útil.

O balanço sedimentar global da duna de São João da Caparica, entre a campanha 1 e 8 (Fevereiro de 2015 e Novembro de 2016) revelou-se positivo e da ordem dos 5100 m³. Este resultado evidencia que, durante o período de monitorização, a duna acumulou mais sedimento do que perdeu, apesar de se terem registado variações sazonais nos valores da acreção e erosão. A acumulação foi mais significativa ao longo do cordão dunar primário e em algumas zonas do tardo da duna (Figura 6.23). Estas acumulações pontuais no tardo da duna resultaram possivelmente de escorrência superficial associada a episódios de precipitação intensa e duradoura.

6.3 Vento e Transporte sólido eólico potencial

6.3.1 Vento total

A Figura 6.26 à Figura 6.30 representam a distribuição direccional das ocorrências de todos os ventos (vento total) medidos e modelados nos intervalos de tempo 2001-2011 e 2002-2012. A Tabela 6.5 à Tabela 6.9 apresentam a frequência dessas mesmas ocorrências agrupadas por octantes.

A distribuição dos ventos do modelo numérico no período de 2001 a 2011, foi comparada com a distribuição dos ventos medidos na estação do Monte da Caparica - INAG (Barata *et al.*, 2013) no mesmo intervalo de tempo (Figura 6.26, Figura 6.27, Tabela 6.5 e Tabela 6.6). Observa-se em ambos os locais predominância dos ventos de norte e nordeste com ocorrências superiores a 45 % e a existência de poucas ocorrências no quadrante sudeste. As diferenças registadas prendem-se com a frequência das ocorrências dos octantes noroeste e sudoeste: o modelo numérico indica metade da frequência observada no octante sudoeste e quase duplica a contribuição de ventos dos octantes oeste e noroeste em relação às observações na estação do Monte da Caparica

Verifica-se que, de um modo geral, existem semelhanças na distribuição direccional e na magnitude das ocorrências de vento nos dois casos. Mas as diferenças encontradas nas ocorrências de sudoeste, fortemente oblíquas à orientação geral da duna, sugerem que os dados obtidos de estações afastadas da área de estudo podem não ser representativos das condições de vento local.

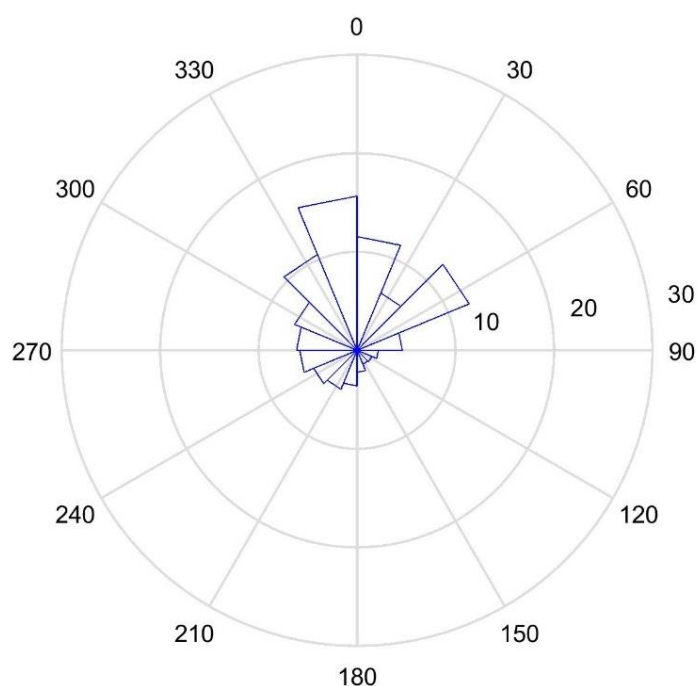


Figura 6.26 – Distribuição direccional das ocorrências de vento modelado (modelo numérico; 2001-2011).

Tabela 6.5 – Frequências de ocorrência de vento modelado (modelo numérico: 2001-2011).

Modelo Numérico: 2001-2011									
Octantes	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	TOTAL
Ocorrências (%)	27	19	7	3	6	9	12	17	100

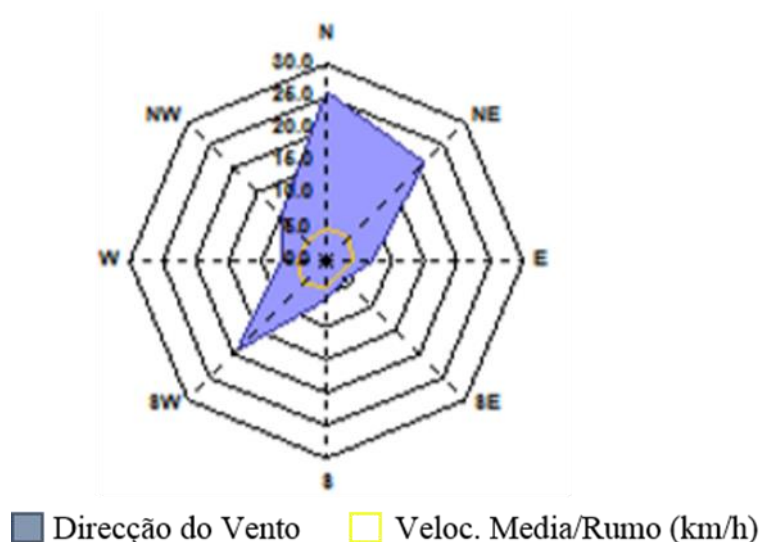


Figura 6.27 – Distribuição direccional do vento medido na estação do Monte da Caparica: 2001-2011(adaptado de Barata et al., (2013)).

Tabela 6.6 – Frequência de ocorrências de vento medido na estação do Monte da Caparica: 2001-2011.

Monte da Caparica: 2001-2011									
Octantes	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	TOTAL
Ocorrências (%)	26	23	7	3	7	19	5	10	100

As três séries de dados medidos aqui utilizadas correspondem a intervalos temporais distintos e de modo a permitir uma primeira aproximação à comparação entre registos, confrontaram-se os dados obtidos (modelo numérico, estação do IDL e estação da Praia da Rainha) no intervalo de tempo comum de 2002 a 2012.

A Figura 6.28 e a Tabela 6.7 (dados do modelo numérico) mostram que cerca de 30 % das ocorrências provêm do octante norte e 20 % do octante nordeste. Registam-se poucos eventos do quadrante sudeste e as ocorrências de vento das bandas de oeste variam entre 10 e 20 %.

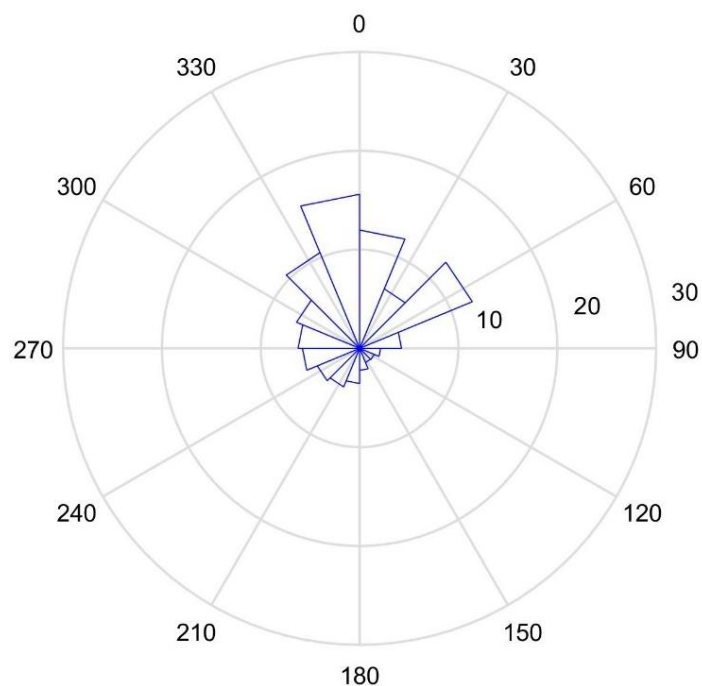


Figura 6.28 – Distribuição direccional do vento modelado (modelo numérico: 2002-2012).

Tabela 6.7 – Frequências de ocorrência de vento modelado (modelo numérico: 2002-2012).

Modelo Numérico: 2002-2012									
Octantes	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	TOTAL
Ocorrências (%)	28	19	6	3	6	9	12	17	100

A observação da Figura 6.29 e da Tabela 6.8, relativamente à série obtida no IDL, permite concluir observar uma dominância muito marcada dos ventos do octante norte e nordeste com 40 % e 20 % das ocorrências, respectivamente. As observações do quadrante sudeste são muito reduzidas e os ventos das bandas de oeste apresentam ocorrências da ordem dos 12 %.

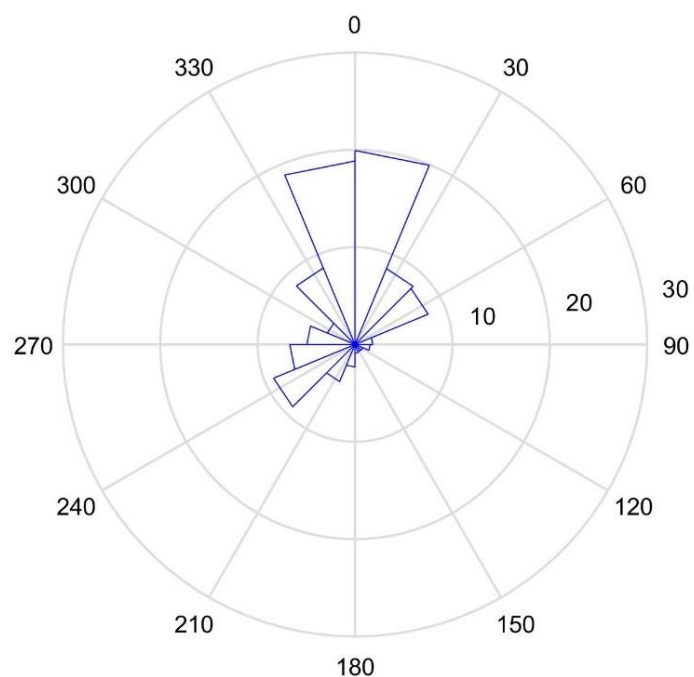


Figura 6.29 – Distribuição direccional do vento medido (IDL: 2002-2012).

Tabela 6.8 – Frequências de ocorrência de vento medido (IDL: 2002-2012).

IDL: 2002-2012									
Octantes	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	TOTAL
Ocorrências (%)	39	17	3	2	3	13	12	12	100

Na Praia da Rainha (Figura 6.30 e Tabela 6.9) os eventos dominantes provêm também dos octantes norte e nordeste com 27 % e 22 % das ocorrências, respectivamente. As ocorrências do quadrante sudeste são reduzidas e os ventos das bandas de oeste apresentam ocorrências da ordem dos 11 %.

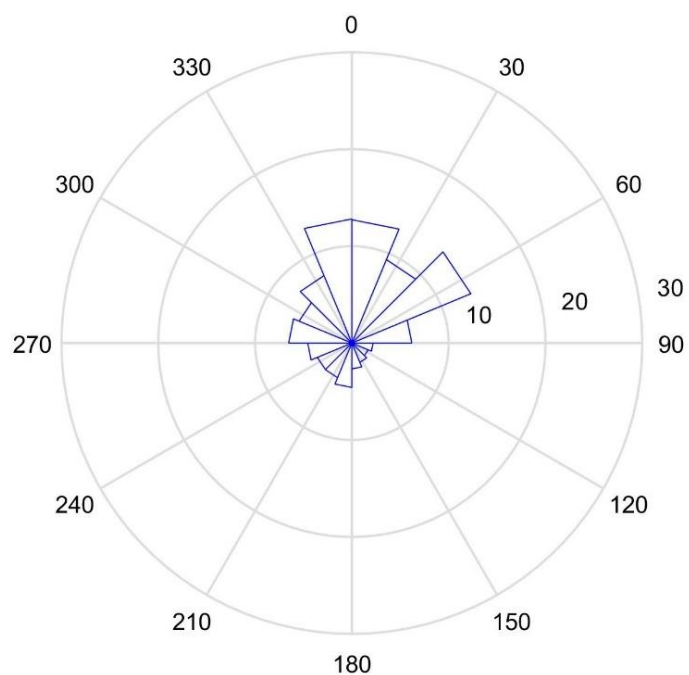


Figura 6.30 – Distribuição direccional do vento medido (Praia da Rainha: 2002-2012).

Tabela 6.9 – Frequências de ocorrência de vento medido (Praia da Rainha 2002-2012).

Praia Rainha: 2002-2012									
Octantes	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	TOTAL
Ocorrências (%)	27	22	8	4	7	8	11	13	100

Destes resultados retira-se que existe maior semelhança entre a distribuição direccional do vento total medido na Praia da Rainha e a distribuição modelada, do que com a distribuição medida na estação do IDL.

Em ambos os casos se se observa uma dominância das ocorrências de vento de norte e nordeste, que totalizam mais de 45 a 49 % das observações, os ventos do quadrante sudeste são raros e os provenientes das bandas de oeste correspondem a frequências da ordem dos 12 %. As observações do IDL também revelam uma dominância dos ventos dos octantes norte e nordeste, mas totalizam cerca de 55 % das ocorrências, mais 8 a 10 % dos valores anteriormente referidos. As ocorrências do quadrante sudeste apresentam uma magnitude reduzida em comparação com os dados modelados e medidos na Praia da Rainha.

6.3.2 Vento eficaz

A Figura 6.31 à Figura 6.33 ilustram a distribuição direccional dos ventos eficazes, medidos e modelados, no mesmo intervalo de tempo (2002-2012) e a Tabela 6.10 à Tabela 6.12 contém as frequências desses ventos agrupados por octantes.

A análise da Figura 6.31 e da Tabela 6.10 (relativamente aos resultados do modelo numérico entre 2002-2012) permite verificar o aumento da dominância dos ventos do octante norte (com cerca de 40 % das ocorrências) e do octante noroeste (com cerca de 20 % de observações). As ocorrências das bandas de oeste predominam sobre os ventos das bandas de leste e a importância relativa dos ventos de noroeste cresceu à custa da diminuição acentuada dos ventos de nordeste.

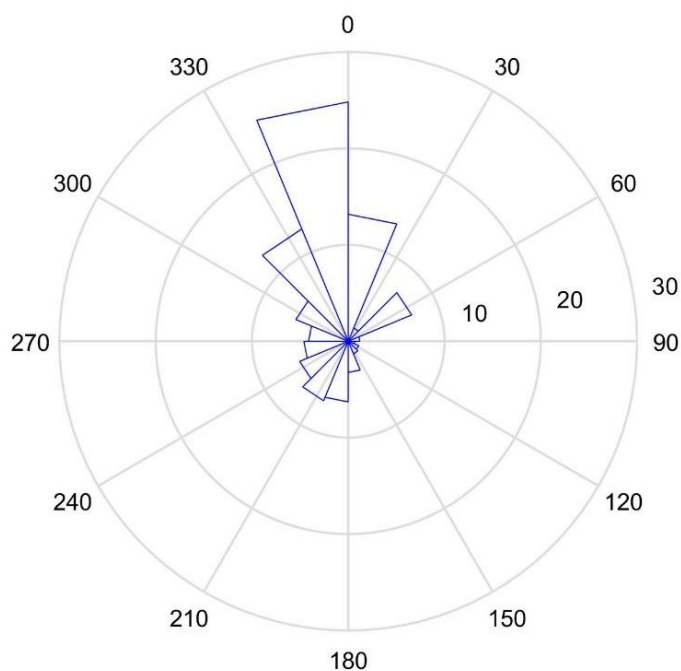


Figura 6.31 – Distribuição direccional do vento modelado (modelo numérico: 2002-2012).

Tabela 6.10 – Frequências de ocorrência de vento modelado (modelo numérico: 2002-2012).

Modelo Numérico: 2002-2012									
Octantes	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	TOTAL
Ocorrências (%)	38	9	2	3	10	12	9	18	100

Na estação do IDL (Figura 6.32 e Tabela 6.11) as ocorrências dos octante norte e sudoeste dominam o registo, totalizando 74 % dos eventos. As ocorrências de noroeste são muito reduzidas e o vento de nordeste representa pouco mais de 10 % das observações. Os restantes rumos estão pouco representados, com menos de 5 % das observações.

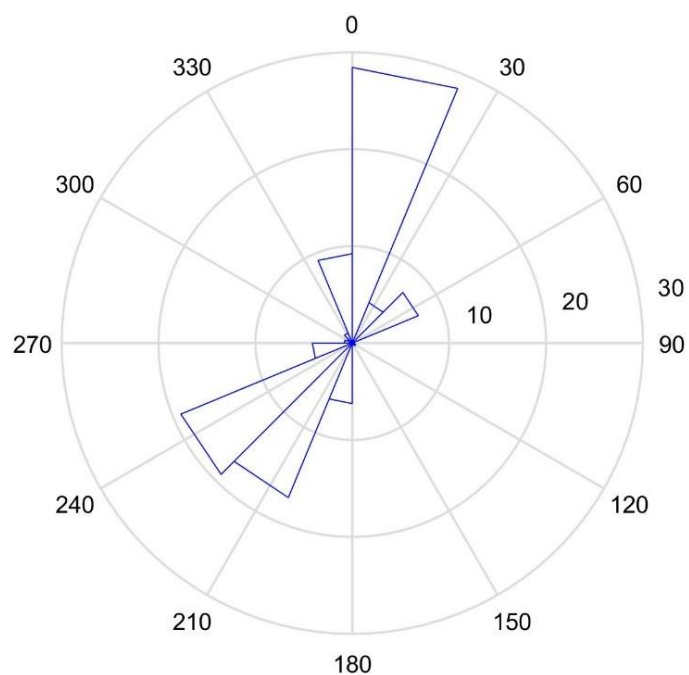


Figura 6.32 – Distribuição direccional do vento medido (IDL: 2002-2012).

Tabela 6.11 – Frequências de ocorrência de vento medido (IDL: 2002-2012).

IDL: 2002-2012									
Octantes	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	TOTAL
Ocorrências (%)	38	12	0.43	1	6	36	5	2	100

Na Praia da Rainha (Figura 6.33 e Tabela 6.12) assiste-se a uma inversão direccional com ocorrências predominantes do octante sul (45 %) e os ventos das bandas de oeste apresentam magnitude reduzidas entre 8 e 15 %. As observações de vento das bandas de leste são raras.

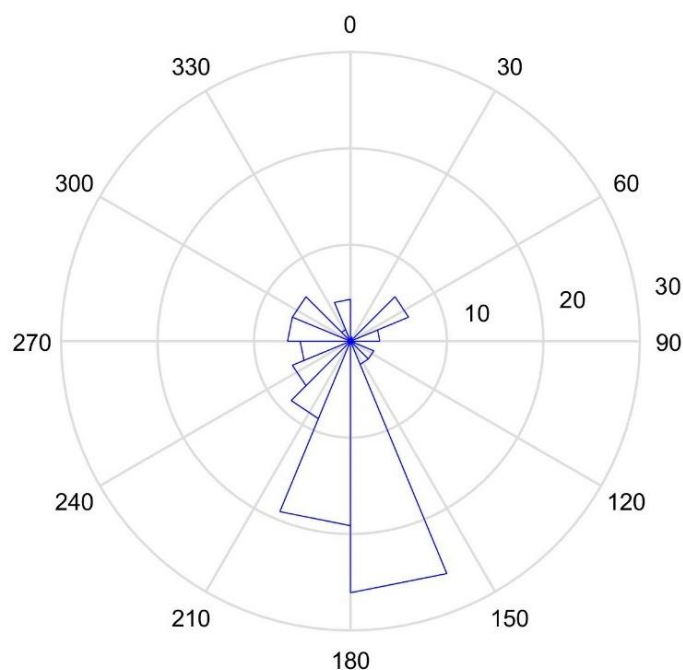


Figura 6.33 – Distribuição direccional do vento medido (Praia da Rainha: 2002-2012).

Tabela 6.12 – Frequências de ocorrência de vento medido (Praia da Rainha 2002-2012).

Praia da Rainha: 2002-2012									
Octantes	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	TOTAL
Ocorrências (%)	5	7	3	5	45	15	12	8	100

A distribuição direccional obtida para os ventos eficazes acentua as diferenças entre estações. Nos resultados do modelo numérico e do IDL verifica-se uma dominância de ventos do octante norte com 38 % das ocorrências em ambos os casos, mas na Praia da Rainha os ventos dominantes provêm do octante sul com 45 % das observações. Por outro lado, no IDL e na Praia da Rainha existem ocorrências significativa de vento provenientes do octante sudoeste (36 % e 15 %, respectivamente), enquanto os dados modelados indicam ocorrências de 18 % do octante noroeste. A única característica comum às três séries de dados são as reduzidas ocorrências de ventos das bandas de leste.

Através dos resultados anteriores não foi possível determinar correspondências entre a distribuição direccional dos ventos produzida pelas três séries, sendo apenas possível determinar semelhanças muito gerais, no que respeita à prevalência da nortada e à fraca representação dos ventos de sudeste.

Os dados de vento cedidos pelo IPMA e pelo IDL foram medidos em anemómetros localizados em áreas geograficamente e topograficamente distintas enquanto os dados do modelo numérico se reportam a um domínio físico alargado e não correspondem a observações pontuais.

Os dados do IDL referem-se a um ponto situado no concelho de Lisboa, a norte do corredor do Tejo, numa zona alta da cidade e densamente urbanizada. Pelo contrário, os dados da Praia da Rainha, foram obtidos numa área plana, praticamente sem urbanização, mas com presença de vegetação de diferentes

dimensões e situada relativamente perto de um obstáculo topográfico relevante, alinhado praticamente norte-sul, a Arriba Fóssil da Costa da Caparica.

As zonas urbanas são constituídas por edifícios de dimensões e formas diferentes e de reduzida porosidade comportando-se como obstáculos ao escoamento do vento. A presença de vegetação arbustiva e arbórea tem efeitos semelhantes e modifica a rugosidade da superfície induzindo alterações ao perfil vertical da velocidade do vento. O facto de as séries de dados terem sido medidas em locais tão diferentes explica as diferenças observadas na distribuição direcciona das ocorrências de vento totais e eficazes apresentadas pelos dados do IDL e da Praia da Rainha.

6.3.3 Transporte Sólido Eólico e Balanço Sedimentar

6.3.3.1 Potencial de transporte sobre superfície seca e húmida

A solução das equações de transporte sólido, parameterizadas para condições de superfície seca e húmida, foi determinada com base nos dados de vento e de precipitação produzidos pelo modelo numérico para o intervalo 1989-2012. A partir destes resultados determinaram-se as componentes de transporte da praia para a duna e da duna para a praia e estimou-se o saldo volumétrico da duna de São João da Caparica, com os resultados apresentados na Tabela 6.13. A distribuição direcciona e as frequências de ocorrência dos vento modelados neste período encontram-se na Figura 6.34 e na Tabela 6.14.

Tabela 6.13 – Taxas de transporte para condições de superfície seca e húmida com base nos dados do modelo numérico: 1989-2012.

Condições	Modelo Numérico: 1989-2012		
	Praia – Duna (m ³ /ano)	Duna – Praia (m ³ /ano)	Balanço sedimentar (m ³ /ano)
Superfície seca	14686	8412	6274
Superfície húmida	9782	7843	1939

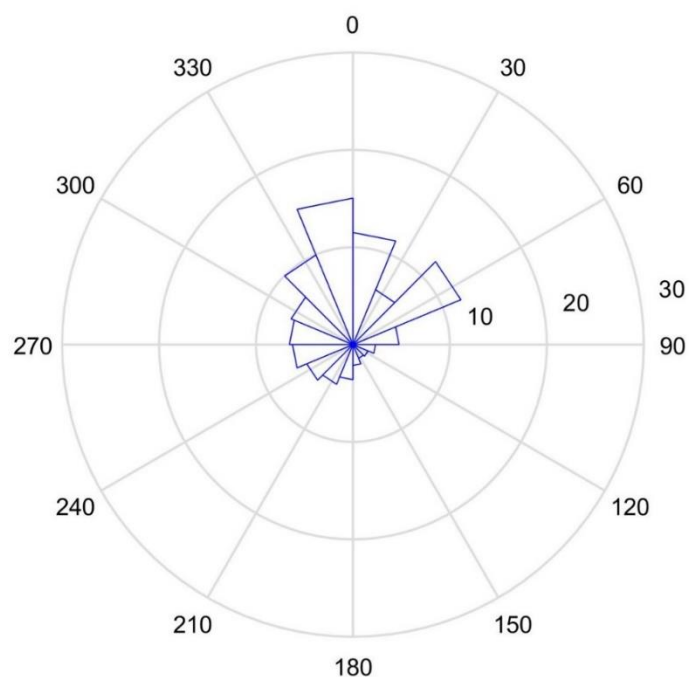


Figura 6.34 – Distribuição direccional do vento modelado (modelo numérico: 1989-2012).

Tabela 6.14 – Frequências de ocorrência de vento modelado (modelo numérico: 1989-2012).

Modelo Numérico: 1989-2012									
Octantes	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	TOTAL
Ocorrências (%)	27	18	7	3	6	10	13	17	100

Os resultados indicam que a introdução da correcção relativa à humidade reduz significativamente a magnitude do transporte sólido potencial. Esta redução afecta principalmente o transporte da praia para a duna (redução de 35 %) e em consequência, o saldo anual, apesar de manter o sinal positivo, diminui para 1/3 do valor calculado quando se assume a superfície sempre seca.

Na avaliação do transporte sólido eólico e dos balanços sedimentares correspondentes aos 21 meses de monitorização no terreno (Fevereiro de 2015 a Novembro de 2016), apresentado a seguir, não se efectuou esta correcção.

6.3.3.2 Potencial de transporte no período de monitorização

Um dos objectivos deste estudo é a comparação de resultados sobre a evolução morfológica da duna de São João da Caparica obtidos a partir dos levantamentos de campo e a partir de balanços sedimentares inferidos através da determinação das taxas de transporte sólido eólico potencial. Atendendo à necessidade de utilizar dados de vento contemporâneos do período de monitorização da duna e dado que a única série temporal que cumpre este requisito é a do IDL, utilizou-se esta série para avaliar o potencial de transporte e calcular os balanços sedimentares.

A Tabela 6.15 e a Tabela 6.16 apresentam as magnitudes das taxas de transporte potencial de areia entre a praia e a duna e a estimativa do balanço sedimentar para diversos intervalos de tempo entre campanhas sucessivas. Estes resultados encontram-se também representados na Figura 6.35 e na Figura 6.36.

A distribuição direccional dos ventos medidos na estação do IDL, em diferentes intervalos de tempo e contemporâneos dos trabalhos de monitorização, e o vector resultante do transporte associado encontram-se no Anexo 5. A intensidade e orientação dos ventos, são os únicos factores que, nesta aproximação, condicionam a magnitude e o sinal do balanço sedimentar da duna. Os valores de balanço sedimentar negativo decorrido entre as campanhas 1 e 2 e as campanhas 6 e 7, estão associados a elevadas ocorrências de vento das bandas de norte e o vector resultante do transporte apresenta uma orientação que promove a perda de sedimento da duna para a praia (Anexo 5.3 A e F). Os balanços sedimentares positivos registados nas restantes campanhas correspondem a ocorrências de vento eficaz predominante das bandas de oeste com uma resultante que promove transporte sedimentar da praia para a duna (Anexo 5.3 B, C, D, E, G, H e I).

Tabela 6.15 – Transporte sólido eólico potencial no período contemporâneo da monitorização da duna.

Campanhas	Praia-Duna (m³)	Duna-Praia (m³)	Balanço (m³)
1	225	614	-389
2	576	192	384
3	931	13	917
4	187	87	100
5	571	114	403
6	8	167	-159
7	8	5	3
8			

Tabela 6.16 – Transporte sólido eólico potencial no período contemporâneo da monitorização da duna.

Campanhas	Praia-Duna (m ³)	Duna-Praia (m ³)	Balanço (m ³)
1 – 4	1731	770	961
4 – 8	721	372	349
1 – 8	2451	1143	1308

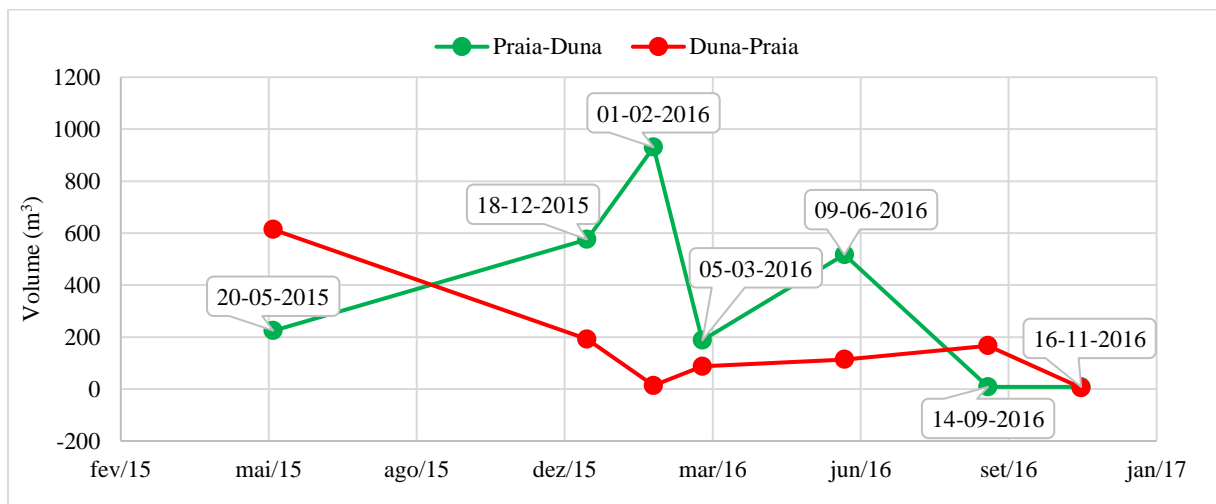


Figura 6.35 – Variação das taxas de transporte entre a praia e a duna, inferidos a partir do regime de ventos.

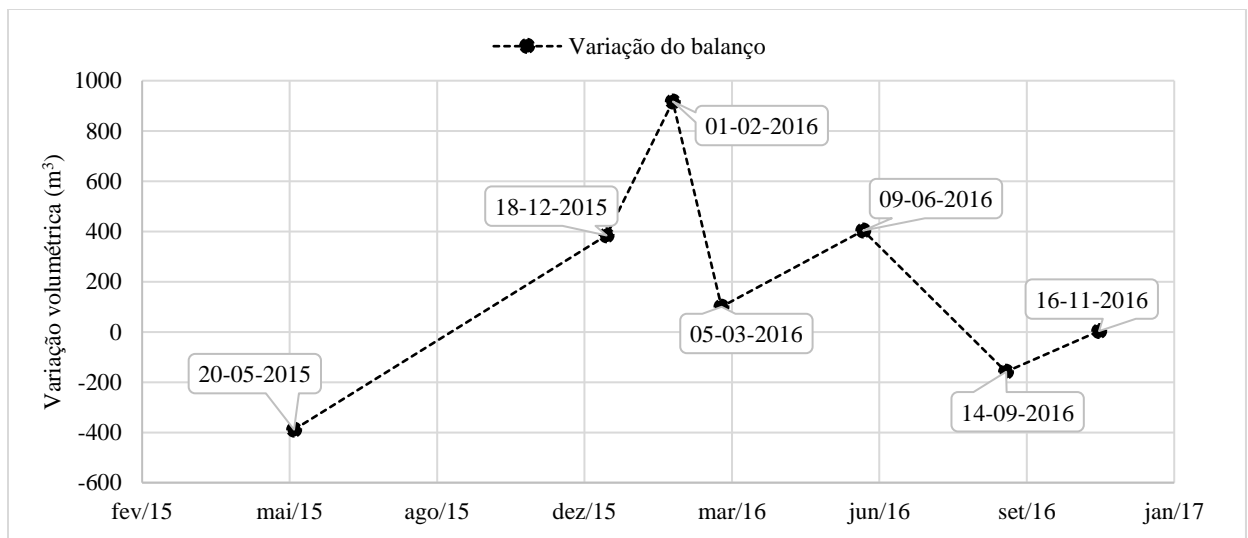


Figura 6.36 – Variação do balanço sedimentar na duna, inferido a partir do regime de ventos.

No primeiro ano de monitorização, entre a campanha 1 e 4 (Fevereiro de 2015 e Fevereiro de 2016), a duna apresentou balanço sedimentar positivo e de 960 m^3 . Durante os 9 meses seguintes, entre as campanhas 4 e 8 (Fevereiro e Novembro de 2016) o balanço manteve-se positivo e da ordem de 350 m^3 , ou seja, quase um terço do valor anterior. O balanço sedimentar global da duna de São João da Caparica, entre as campanhas 1 e 8 (Fevereiro de 2015 e Novembro de 2016), revelou-se positivo e de 1300 m^3 . Registaram-se dois episódios onde o balanço sedimentar da duna foi negativo; entre as campanhas 1 e 2 (saldo de -390 m^3) e entre as campanhas 6 e 7 (saldo de -160 m^3). O balanço entre as campanhas 7 e 8 foi praticamente nulo.

Os resultados obtidos com esta metodologia produzem valores de magnitude significativamente inferior (tipicamente uma ordem de grandeza inferior) aos obtidos a partir da comparação dos MDT (Tabela 6.3, Tabela 6.4, Figura 6.24 e Figura 6.25). Embora ambos os métodos prevejam épocas em que a duna terá perdido sedimento, os períodos em que tal foi observado, por comparação de levantamentos e inferido a partir dos dados de vento, não são os mesmos. O resultado global obtido a partir dos dados de vento é de sinal positivo (indicando captura de sedimento pela duna) mas de magnitude inferior à medida no terreno.

A Figura 6.37 representa a projecção dos resultados do transporte sólido residual (balanço volumétrico) determinados a partir dos dados de vento (IDL) e dos MDT no mesmo intervalos de tempo. Numa primeira análise, os resultados obtidos pelos dois métodos parecem excluir qualquer correlação entre eles. Porém, observa-se que todos os pontos figurativos correspondentes a balanços sedimentares positivos obtidos pelos dois métodos correspondem a períodos em que o vector resultante do transporte potencial determinado na estação do IDL é marcadamente transversal ao alongamento da duna e dirigido para terra. Pelo contrário, todos os restantes três pontos figurativos correspondem a inversões de sinal do saldo do transporte obtido pelos dois métodos e associam-se a rumo médio vectorial dirigido para sul ou sudeste.

Estes resultados podem indicar que as medições no IDL conservam melhor as características do vento na praia quando este sopra das bandas de oeste, não representando adequadamente as ocorrências dos restantes rumos.

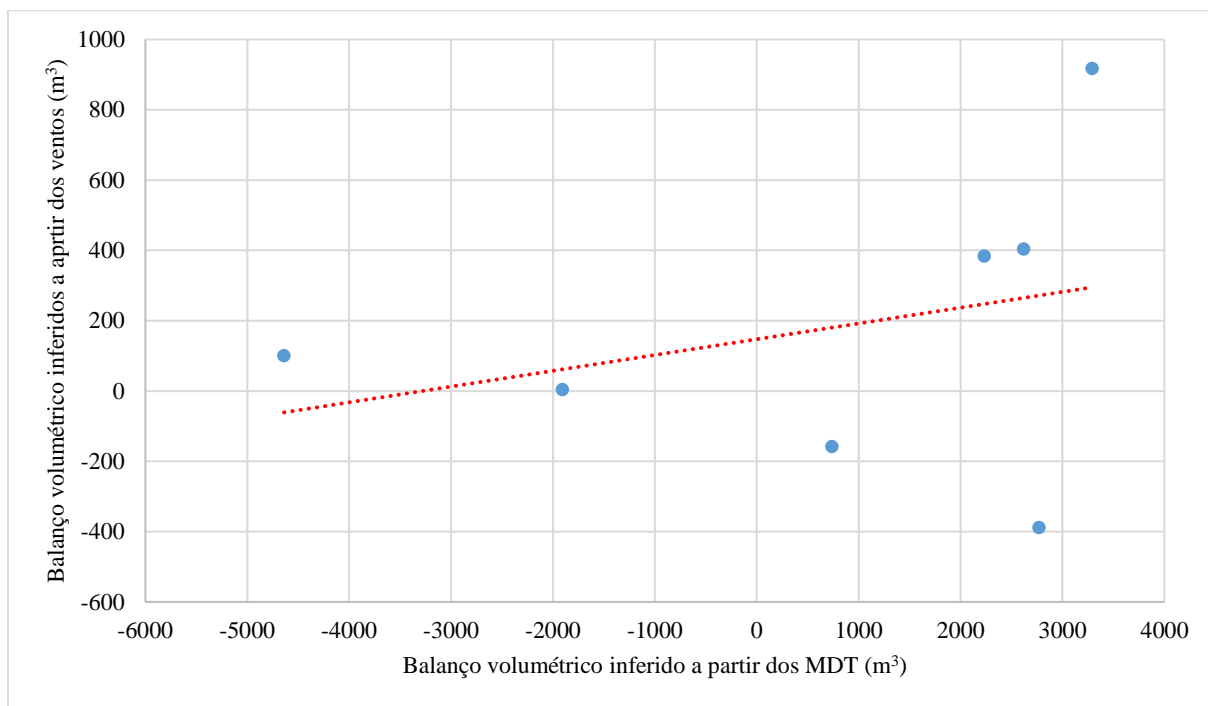


Figura 6.37 – Correlação entre os volumes obtidos a partir dos MDT e do processamento dos dados de vento.

No âmbito deste estudo, simplificou-se a determinação de algumas variáveis condicionantes do potencial de transporte sólido, devido à impossibilidade de se determinarem experimentalmente. Este é o caso do limiar de arranque das partículas, dos parâmetros de rugosidade da superfície e ainda da velocidade do vento à cota do ponto focal que, na aproximação utilizada, só dependem do diâmetro médio das partículas. Embora a medição da altura das *ripple-marks*, tenha reflectido valores semelhantes aos obtidos a partir da granulometria, não foram consideradas perturbações da estrutura do vento induzidas pela vegetação, pelas paliçadas de retenção sedimentar e pela morfologia do cordão dunar. Esta aproximação assume que a distribuição do perfil vertical do vento se mantém invariável sobre a superfície da praia e da duna e é independente do rumo do vento, o que não corresponde à realidade. Para além destas condicionantes, os balanços sedimentares da duna de São João da Caparica foram estimados com base em dados de vento medidos numa área topograficamente distinta e distante da área de estudo. A soma de todos estes factores pode justificar a fraca correlação entre os resultados obtidos.

7. Conclusões

A duna frontal de São João da Caparica materializa o limite leste da praia adjacente com o mesmo nome, correspondendo ao troço costeiro mais a norte do litoral do concelho Almada. Os resultados obtidos neste trabalho mostram que existem trocas sedimentares entre a praia e a duna cuja magnitude foi avaliada através de levantamentos sistemáticos de terreno durante 21 meses.

As areias de duna e de praia são muito semelhantes do ponto de vista textural: correspondem a areia média a fina, bem calibrada a moderadamente bem calibrada e distribuição simétrica com ligeira assimetria no sentido dos grosseiros. As areias de berma exibem uma fracção granulométrica mais grosseira que os restantes domínios amostrados, sugerindo que, quando o vento flui sobre a superfície da berma, transporta até à duna as partículas mais finas, deixando ali as mais grosseiras. Os resultados indicam que o material sedimentar que chega à duna provém maioritariamente da berma, pois trata-se do domínio do perfil de praia localizado mais próximo da duna e que apresenta, durante mais tempo, a superfície seca, disponibilizando material para ser remobilizado pelo vento. As areias de berma e duna apresentam dimensão média de aproximadamente 2ϕ (0.25 mm), idêntica à das partículas utilizadas na construção de formulações de transporte sólido por diversos autores. Este facto diminui a incerteza associada a esta variável na estimativa da velocidade de atrito crítica e dos parâmetros de rugosidade.

O estudo da evolução morfológica da duna de São João da Caparica, permitiu concluir que esta é hoje formada por dois cordões dunares: um cordão dunar frontal primário, ainda incipiente, e um cordão dunar frontal secundário, estabilizado. Na primeira campanha de monitorização (Fevereiro de 2015), era apenas visível a presença de um único edifício dunar com crista à cota 8-10 m. Na segunda campanha (Maio de 2015) já se observa a acreção de um novo cordão dunar primário junto da primeira fiada de paliçadas e na última campanha de monitorização (Novembro de 2016), foi possível observar que o mesmo já atingia a cota 5 m, sem exibir migração para o interior. Estes resultados permitem concluir que as paliçadas e a vegetação, colocadas no início do ano de 2015, desempenharam um importante papel na retenção e fixação de areias eólicas, contribuindo para a acreção de um corpo dunar primário que, 21 meses depois, tem expressão cartográfica e no campo.

Aproximadamente um ano depois da construção das paliçadas de retenção a duna frontal de São João da Caparica apresentou um balanço sedimentar de $+8300\text{ m}^3$. Durante este período registou-se acumulação em quase toda a área da duna, mas a maior parte da acreção concentrou-se ao longo do cordão dunar primário em relação com a primeira fiada de paliçadas. Nos restantes 9 meses de monitorização o saldo sedimentar da duna foi negativo e da ordem de -3100 m^3 . A perda sedimentar que ocorreu neste intervalo de tempo teve expressão cartográfica na generalidade da superfície dunar, excepto no cordão dunar primário que manteve um sinal positivo, indicando acreção.

O balanço sedimentar global da duna, 21 meses depois da intervenção, foi positivo e pouco superior a 5000 m^3 . Estes resultados permitem concluir que as medidas adoptadas no âmbito do projecto ReDuna foram eficazes no que respeita ao objectivo de promover a acumulação de sedimento na duna. Porém, esta acumulação afectou principalmente uma faixa estreita do aparelho dunar, mais próxima da praia e condicionada pelo efeito de retenção da fiada mais externa das paliçadas, onde se observou formação de um novo cordão primário. A região interna manteve-se estável à escala deste intervalo de tempo, apesar de se ter registado alguma variabilidade sazonal e também espacial, cuja origem pode reflectir a dinâmica da superfície, incerteza associada ao método de levantamento (operadores diferentes na mesma campanha e em campanhas diferentes; enterramento do operador na areia; basculamento da antena) e

de processamento (interpolação da superfície partindo de nuvens de pontos com localização e densidades diferentes), ou a combinação destes factores.

As séries de dados de vento analisadas no âmbito deste trabalho reportam-se a períodos e estações diferentes, incluindo dados observados e modelados.

A comparação de dados sinópticos medidos no Instituto Dom Luiz (IDL), na Praia da Rainha e obtidos através do modelo numérico, mostra que existem diferenças significativas na distribuição direccional dos ventos e nas frequências de ocorrência, em particular quando se consideram ventos eficazes, sugerindo que existem efeitos locais muito importantes que condicionam o escoamento do vento e consequentemente o potencial de transporte. Em termos muito gerais a área de estudo pode ser caracterizada pelo predomínio da nortada e por ocorrências significativas de ventos de oeste e nordeste, com muito fraca representação dos ventos do quadrante sudeste.

A única série contemporânea do período de monitorização da duna foi obtida da estação do IDL a partir dal qual se estimaram taxas de transporte eólico entre a praia e a duna com base em formulações empíricas. O resultado determinado para o primeiro ano de monitorização foi de $+960 \text{ m}^3$. Durante os 9 meses seguintes a magnitude do balanço sedimentar diminuiu, resultando num saldo de $+350 \text{ m}^3$. O saldo global da duna de São João da Caparica para o período total da monitorização obtido com este método apresentou-se positivo e com magnitude de $+1310 \text{ m}^3$.

A comparação destes resultados com os obtidos a partir dos levantamentos de campo, no mesmo intervalo de tempo, mostra diferenças no sinal e na magnitude dos volumes determinados.

A disparidade observada deve-se em parte à simplificação do perfil vertical do vento sobre a superfície da duna e das variáveis utilizadas nas formulações do potencial de transporte sólido. O facto de a série de dados do IDL ter sido medida a 11 km de distância do local de estudo e em ambiente urbano, condições distintas das que caracterizam a praia de São João da Caparica, será a principal razão que justifica aquela disparidade.

A fraca correlação entre os resultados obtidos pelos dois métodos não permitiu concluir sobre a influência do regime de ventos na evolução morfológica da duna nem validar a hipótese de que os episódios de erosão registado na duna com base nos Modelos Digitais de Terreno (MDT) se devessem a ocorrências de ventos intensos de terra.

8. Considerações Finais

Os balanços sedimentares determinados a partir da estimativa do potencial de transporte do vento entre a praia e a duna e dos levantamentos topográficos na área de estudo evidenciaram uma fraca correlação.

Uma forma de tentar melhorar a relação entre os resultados obtidos a partir de medições no terreno e os inferidos através do regime eólico seria instalar uma estação anemométrica localizada sobre o edifício dunar. Se em trabalhos futuros houver a possibilidade de concretizar esta opção, seria conveniente muni-la de pelo menos dois anemômetros a fim de esclarecer o perfil de velocidades do vento. As variáveis aqui determinadas a partir da bibliografia poderiam ser também validadas através da instalação de armadilhas eólicas, minimizando a incerteza associada.

9. Referências Bibliográficas

- APA. (2014). *Registo das Ocorrências no Litoral: Temporal de 3 a 7 de Janeiro de 2014*. Relatório Técnico. Lisboa.
- Bagnold, R. (1941). *The physics of blown sand and desert dunes*. Chapman & Hall. London.
- Barata, A., Cabaço, J.G. & Silva, M.L. (2013). Entregável 1.1.1.a. *Estudo no litoral na área de intervenção da APA, I.P. /ARH do Tejo*: Caracterização do regime de ventos do litoral. Relatório Técnico, Projeto Criação e implementação de um sistema de monitorização no litoral abrangido pela área de jurisdição da Administração da Região Hidrográfica do Tejo. FFCUL/APA, I.P. Lisboa. Junho 2013.
- Bauer, B.O. & Davidson-Arnott, R.G. (2003). A general framework for modeling sediment supply to coastal dunes including wind angle, beach geometry, and fetch effects. *Geomorphology*. **49**: 89-108.
- Bauer, B.O., Davidson-Arnott, R.G.D., Hesp, P.A., Namikas, S.L., Ollerhead, J. & Walker, I.J. (2009). Aeolian sediment transport on a beach: Surface moisture, wind fetch, and mean transport. *Geomorphology*. **105**: 106-116.
- Belly, P.Y. (1964). *Sand movement by wind*. Technical Memorandum (1). U.S Army Coastal Engineering Research Center. Washington D. C.
- CMA. (2011). Revisão do Plano Director Municipal de Almada: Estudo de Caracterização do Território Municipal, Caderno 2, Sistema Ambiental. Almada.
- CMA/DEGAS & FCT/CEG. (2005). *Carta Geológica do Concelho de Almada na escala 1:20000*, com Pormenorização da Zona Ribeirinha Norte na escala 1:15000. Acessível na Câmara Municipal de Almada. Departamento de Estratégia e Gestão Ambiental Sustentável da Câmara Municipal de Almada e Centro de Estudos Geológicos da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Almada.
- Diogo, Z., Bastos, A., Lira, C., Taborda, R., Andrade, C., Silveira, T.M., Ribeiro, M., Silva, A.N., Carapuço, M.M., Pinto, C.A. & Freitas, M.C. (2014). Morphological impacts of Christina storm on the beaches of the central western Portuguese. *Acta do 9º Congresso Nacional de Geologia*. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. 18 a 24 de Junho de 2014.
- Diogo, Z.S., Silveira, T.M., Sousa, H., Carapuço, A.M., Silva, A.N., Lira, C., Taborda, R. & Andrade, C.F. (2013). Entregável 2.2.c. *Caracterização da variabilidade morfodinâmica sazonal e pós-temporal das praias da Costa da Caparica*. Relatório Técnico, Projeto Criação e implementação de um sistema de monitorização no litoral abrangido pela área de jurisdição da Administração da Região Hidrográfica do Tejo. FFCUL/APA, I.P. Lisboa. Junho 2013.
- Folk, R.L. & Ward, W.C. (1957). Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Research*. **27**: 3-26.

Freire, M.E. (1989). *A planície litoral entre a Trafaria e a Lagoa de Albufeira*. Dissertação de Mestrado em Geografia Física e Regional. Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa. Lisboa. 204pp.

Hesp, P. (1988). Morphology, dynamics and internal stratification of some established foredunes in southeast Australia. *Sedimentary Geology*. **55**: 17-41.

Hotta, S., Kubota, S., Katori, S. & Horikawa, K. (1984). Sand transport by wind on a wet sand surface. In: Billy, L.E. (eds). *Coastal Engineering. 19th International Conference on Coastal Engineering*. Houston, Texas, United States, September 3-7. American Society of Civil Engineers.

Hsu, S. A. & Weggel, J. R. (2002). Wind-blown sediment transport. Engineering Manual (Part III). Coastal Engineering Research Center. Mississippi.

Kulberg, M.C., Kulberg, J.C. & Terrinha, P. (2000). Tectónica da Cadeia da Arrábida. In: Tectónica das regiões de Sintra e Arrábida. Mem. Geociências, Museu Nac. Hist. Nat. Univ. Lisboa. **2**: 35-84.

Lancaster, N. (2009). Aeolian features and processes. In: Young, R. & Norby, L. (eds.), *Geological Monitoring*, The Geological Society of America. Colorado.

Martínez, M.L., Psuty, N.P. & Lubke, R.A. (2004). A perspective on coastal dunes. In: Martínez, M.L. & Psuty, N.P (eds.), *Coastal dunes: Ecology and Conservation*. Springer. Berlin.

Pais, J., Moniz, C., Cabral, J., Cardoso, J.L., Legoinha, P., Machado, S., Morais, M.A., Lourenço, C., Ribeiro, M.L., Henriques, P. & Falé, P. (2006). *Carta Geológica de Portugal na Escala 1:50000* - Notícia Explicativa da Folha 34-D, Lisboa. Serviços Geológicos Portugal. Lisboa.

Psuty, N.P. (2004). The coastal foredune: A morphological basis for regional coastal dune development. In: Martínez, M.L. & Psuty, N.P (eds.), *Coastal dunes: Ecology and Conservation*. Springer. Berlin.

Pye, K. & Tsoar, H. (2009). *Aeolian sand and sand dunes*. Springer Science & Business Media. Berlin.

Ramalho, M., Rey, J., Zbyszewski, G., Alves, A., Palácios, T., Almeida, F., Costa, C. & Kullberg, M. (2001). *Carta Geológica de Portugal na Escala 1:50000* - Notícia Explicativa da Folha 34-C, Lisboa. Instituto Geológico e Mineiro. Lisboa.

Seoane, C.L.V., Fernández, J.B.G. & Pascual, C.V. (2007). Manual de restauración de dunas costeras. Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General de Costas

Silveira, T.M., Guimarães, H., Sousa, H., Taborda, R. & Andrade, C.F. (2013). Entregável 2.1.a *Rede de pontos de apoio da Costa da Caparica*. Relatório Técnico, Projeto Criação e implementação de um sistema de monitorização no litoral abrangido pela área de jurisdição da Administração da Região Hidrográfica do Tejo. FFCUL/APA, I.P. Lisboa. Junho 2013.

Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, O.D., Barker, M. D., Duda, G. M., Huang, X., Wang, W. & Powers G. J. (2008). A description of the advanced research WRF version 3. (NCAR/TIN-475+STR). National Center Atmospheric Research Tech.

Soares, P. M., Cardoso, R. M., Miranda, P. M., de Medeiros, J., Belo-Pereira, M. & Espirito-Santo, F. (2012). WRF high resolution dynamical downscaling of ERA-Interim for Portugal. *Climate Dynamics*. **39**: 2497-2522.

Spies, P.J. & McEwan, I.K. (2000). Equilibration of saltation: Earth surface processes and landforms. **25**: 437- 453.

Teixeira, S. (1990). *Dinâmica das Praias da Península de Setúbal (Portugal)*. Dissertação do Mestrado em Geologia Económica e Aplicada. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Lisboa. 189pp.

Troen, T. & Peterson, E. (1989). European Wind Atlas. Riso National Laboratory. Denmark.

Zbyszewski, G., Ferreira, O., Manuppella, G. & Assunção, C. (1965). *Carta Geológica de Portugal na Escala 1:50000* - Notícia Explicativa da Folha 38-B, Setúbal. Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa.

10. Anexos

Anexo 1. Localização e designação dos equipamentos de praia



Anexo 1.1 – Localização dos equipamentos de praia existentes na duna de São João da Caparica.

Anexo 2. Parâmetros granulométricos da duna e praia de São João da Caparica.

Anexo 2.1 – Parâmetros granulométricos das areias de praia de São João da Caparica (Berma).

Amostra	Perfil	Campanha	Média Gráfica (φ)	Desvio Padrão Gráfico (φ)	Assimetria	Curtose
Berma	PCC2	19-03-2011	1.61	0.48	-0.02	0.98
	PCC2	04-06-2011	1.74	0.48	-0.06	0.96
	PCC6	04-06-2011	1.28	0.62	-0.05	1.08
	PCC2	12-09-2011	1.64	0.46	0.00	0.94
	PCC6	12-09-2011	1.10	0.56	-0.07	1.07
	PCC2	29-11-2011	1.66	0.54	-0.03	1.00
	PCC6	29-11-2011	1.47	0.48	0.09	1.02
	PCC2	12-03-2012	1.75	0.46	-0.02	0.89
	PCC6	12-03-2012	1.71	0.47	-0.01	0.88
	PCC2	06-06-2012	1.74	0.47	0.01	0.91
	PCC6	06-06-2012	1.68	0.47	-0.01	0.93
	PCC2	04-09-2012	1.70	0.47	0.02	0.92
	PCC6	04-09-2012	1.84	0.43	-0.03	0.94
	PCC2	02-12-2012	2.05	0.47	-0.14	1.09
	PCC6	02-12-2012	2.02	0.43	-0.11	1.03
	PCC2	01-03-2013	1.96	0.35	0.01	0.80
	PCC6	01-03-2013	1.49	0.56	-0.20	1.15
	PCC2	11-06-2013	1.66	0.48	0.03	0.89
	PCC6	11-06-2013	1.52	0.47	0.00	0.99
	PCC2	09-12-2013	1.91	0.47	-0.08	0.96
	PCC6	09-12-2013	1.16	0.45	-0.02	1.04
	PCC2	12-09-2014	1.34	0.61	0.12	1.00
	PCC2	07-03-2016	1.83	0.49	0.01	1.01
	PCC6	07-03-2016	2.14	0.38	-0.10	1.23
	PCC2	14-10-2015	1.84	0.47	-0.04	0.93
	PCC6	14-10-2015	2.03	0.56	-0.19	1.03
	PF1	09-06-2016	2.02	0.51	-0.19	1.09
	PF1	09-06-2016	2.39	0.31	0.21	0.89
	PF2	09-06-2016	2.13	0.42	-0.13	1.25
	PF2	09-06-2016	2.36	0.34	0.15	1.16
	PCC2	07-06-2016	1.81	0.49	0.00	0.95
	PCC6	07-06-2016	2.02	0.41	-0.06	0.98
	PCC2	16-09-2016	1.81	0.46	-0.03	0.91
	PCC6	16-09-2016	2.09	0.41	-0.14	1.10
	PF1	30-09-2016	2.10	0.41	-0.17	1.18
	PF1	30-09-2016	1.83	0.58	-0.07	0.97
	PF2	30-09-2016	2.30	0.37	0.07	1.35
	PF2	30-09-2016	2.07	0.43	-0.14	1.11

Anexo 2.2 – Parâmetros granulométricos das areias de praia de São João da Caparica (Face de praia).

Amostra	Perfil	Campanha	Média Gráfica (φ)	Desvio Padrão Gráfico (φ)	Assimetria	Curtose
Face de Praia	PCC2	19-03-2011	2.00	0.42	-0.09	0.98
	PCC6	19-03-2011	2.06	0.40	-0.03	0.95
	PCC2	04-06-2011	2.02	0.38	-0.03	0.90
	PCC6	04-06-2011	2.20	0.40	-0.04	1.19
	PCC2	12-09-2011	2.01	0.42	-0.01	0.99
	PCC6	12-09-2011	1.95	0.40	0.01	0.94
	PCC2	29-11-2011	1.54	0.44	0.15	0.93
	PCC6	29-11-2011	1.78	0.52	-0.16	1.22
	PCC6	12-03-2012	1.75	0.56	-0.02	0.86
	PCC2	06-06-2012	1.85	0.47	0.02	0.98
	PCC6	06-06-2012	1.88	0.37	0.09	1.02
	PCC2	04-09-2012	1.78	0.61	-0.19	1.04
	PCC6	04-09-2012	2.03	0.47	-0.10	1.02
	PCC2	02-12-2012	1.97	0.45	-0.05	1.00
	PCC6	02-12-2012	2.12	0.37	-0.09	1.09
	PCC2	01-03-2013	1.54	0.53	0.11	0.95
	PCC6	01-03-2013	1.93	0.42	-0.15	0.96
	PCC2	11-06-2013	1.91	0.40	-0.04	0.90
	PCC6	11-06-2013	1.64	0.47	0.10	0.86
	PCC2	09-12-2013	1.90	0.52	-0.17	0.98
	PCC6	09-12-2013	1.81	0.56	-0.14	0.99
	PCC2	08-01-2014	1.76	0.35	0.02	1.25
	PCC2	16-04-2014	1.92	0.48	-0.09	0.96
	PCC6	16-04-2014	2.27	0.33	0.05	1.42
	PCC2	12-09-2014	2.37	0.36	0.12	1.07
	PCC6	12-09-2014	1.58	0.40	-0.03	0.92
	PCC2	09-12-2014	2.08	0.41	-0.12	1.05
	PCC6	09-12-2014	2.09	0.47	-0.12	1.07
	PCC2	06-02-2015	1.93	0.50	-0.15	1.00
	PCC6	06-02-2015	2.01	0.42	-0.15	1.00
	PCC2	23-05-2015	1.66	0.57	-0.02	0.82
	PCC6	23-05-2015	2.02	0.55	-0.17	1.00
	PCC2	07-03-2016	1.88	0.39	0.05	0.98
	PCC6	07-03-2016	1.77	0.50	0.02	0.87
	PCC2	14-10-2015	2.05	0.45	-0.10	1.04
	PCC6	14-10-2015	1.72	0.46	0.04	0.93
	PCC6	07-06-2016	2.24	0.35	0.00	1.33
	PCC2	07-06-2016	2.02	0.41	-0.07	0.98
	PCC6	16-09-2016	2.10	0.39	-0.06	0.99
	PCC2	16-09-2016	1.86	0.44	-0.01	0.95

Anexo 2.3 – Parâmetros granulométricos das areias de duna de São João.

Amostra	Perfil	Campanha	Média Gráfica (ϕ)	Desvio Padrão Gráfico (ϕ)	Assimetria	Curtose
Duna	PCC2	12-09-2011	1.74	0.59	-0.07	0.93
	PCC2	29-11-2011	1.83	0.45	-0.01	0.97
	PCC2	12-03-2012	1.71	0.46	0.02	0.87
	PCC2	04-09-2012	2.00	0.46	-0.13	1.03
	PCC2	02-12-2012	1.83	0.48	-0.07	0.91
	PCC2	11-06-2013	1.80	0.49	0.00	0.99
	PCC2	09-12-2013	1.99	0.39	-0.03	0.94
	PCC2	08-01-2014	1.73	0.44	0.00	0.95
	PF1	09-06-2016	1.75	0.54	-0.09	0.92
	PF1	09-06-2016	2.12	0.52	-0.19	1.20
	PF2	09-06-2016	1.64	0.57	0.04	0.94
	PF2	09-06-2016	2.06	0.45	-0.17	1.12
	PF1	30-09-2016	1.68	0.65	-0.05	0.97
	PF1	30-09-2016	2.14	0.43	-0.06	1.08
	PF2	30-09-2016	1.68	0.65	-0.05	0.97
	PF2	30-09-2016	2.27	0.37	0.03	1.37

Anexo 2.4 – Classificação dos grãos quanto à dimensão média (M_z) (Wentworth, 1922).

Classificação	Escala (ϕ)
Seixo	$M_z < -2$
Cascalho	$-2 < M_z < -1$
Areia muito grosseria	$-1 < M_z < 0$
Areia grosseira	$0 < M_z < 1$
Areia média	$1 < M_z < 2$
Areia fina	$2 < M_z < 3$
Areia muito fina	$3 < M_z < 4$
Silte	$M_z > 4$

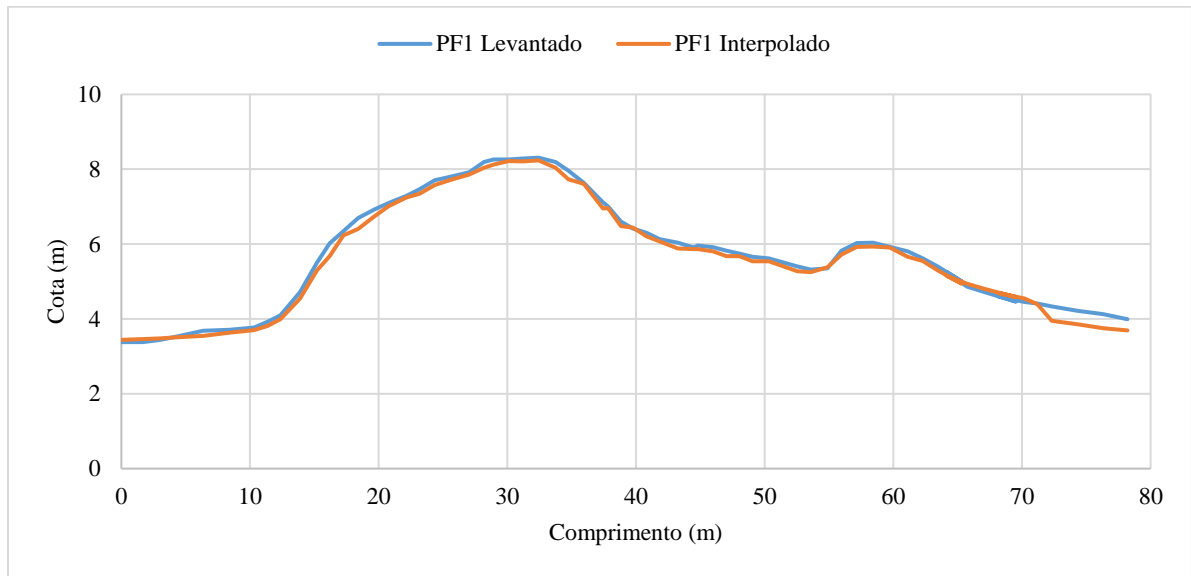
Anexo 2.5 – Classificação dos grãos quanto ao desvio padrão gráfico inclusivo (σ_1) (Folk & Ward, 1957).

Classificação	Escala (ϕ)
Muito bem calibrado	< 0.35
Bem calibrado	$0.35 - 0.50$
Moderadamente bem calibrado	$0.50 - 0.71$
Moderadamente calibrado	$0.71 - 1.0$
Mal calibrado	$1.0 - 2.0$
Muito mal calibrado	$2.0 - 4.0$
Extremamente mal calibrado	> 4.0

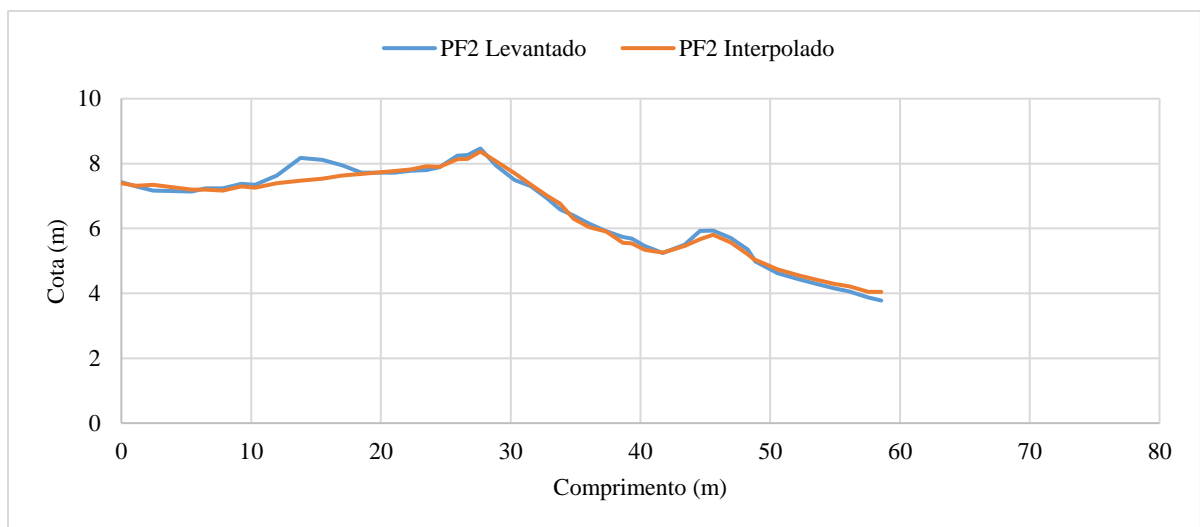
Anexo 2.6 – Classificação dos grãos quanto à assimetria (SKI) (Folk & Ward, 1957).

Classificação	SKI
Fortemente assimétrica no sentido dos finos	+1.00 - +0.30
Assimétrica no sentido dos finos	+0.30 - +0.10
Aproximadamente simétrica	+0.10 - -0.10
Assimétrica no sentido dos grosseiros	-0.10 - -0.30
Fortemente assimétrica no sentido dos grosseiros	-0.30 - - 1.00

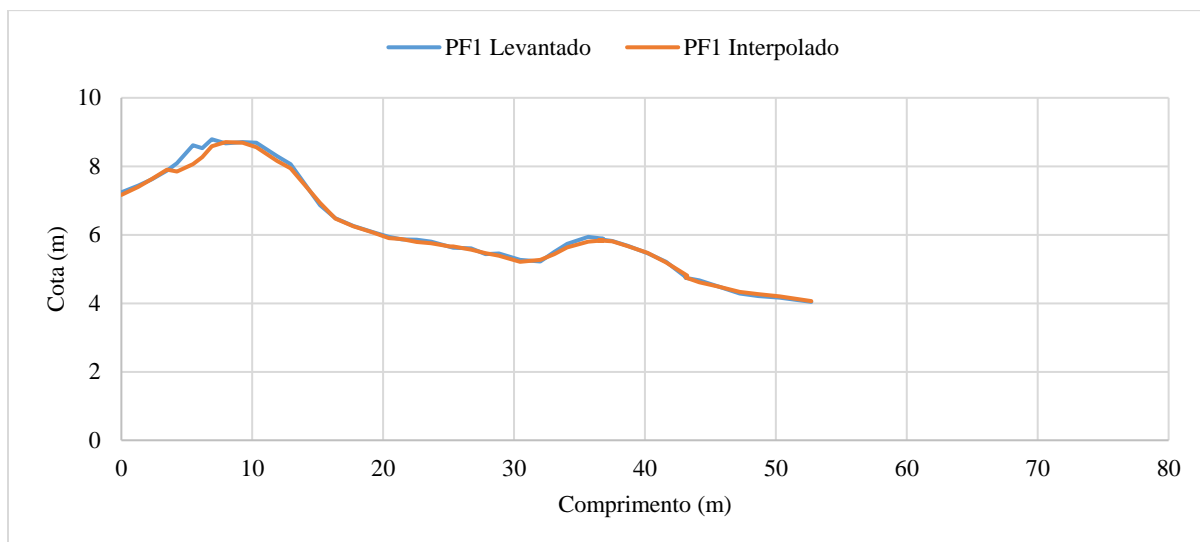
Anexo 3. Interpolação dos Perfis PF1 e PF2



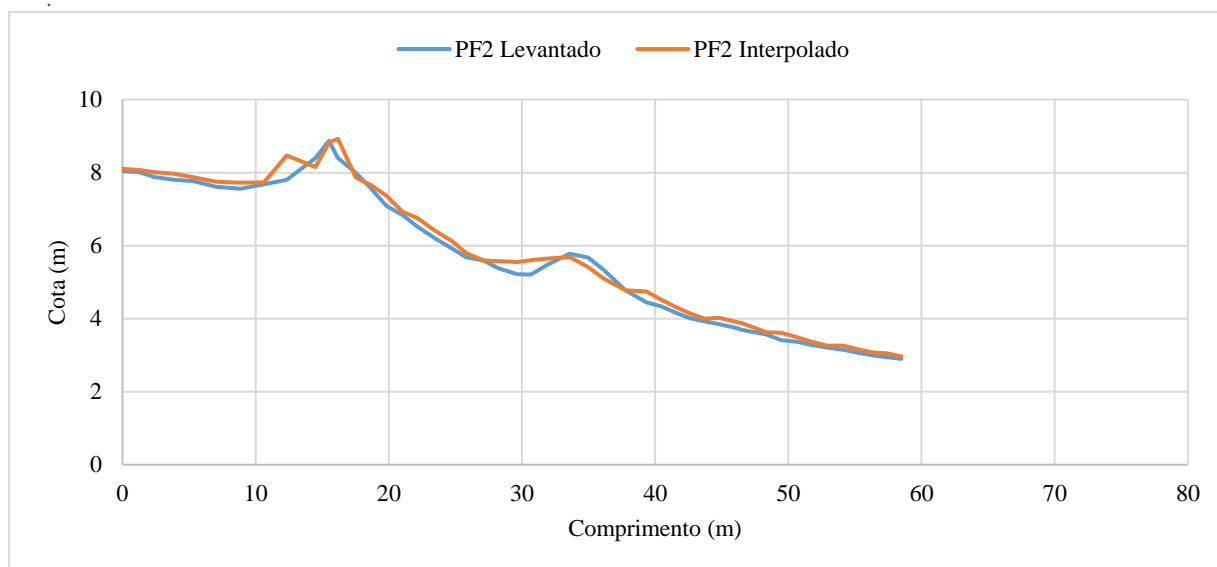
Anexo 3.1 – Comparação do perfil PF1 levantado e interpolado a partir do MDT da campanha 6.



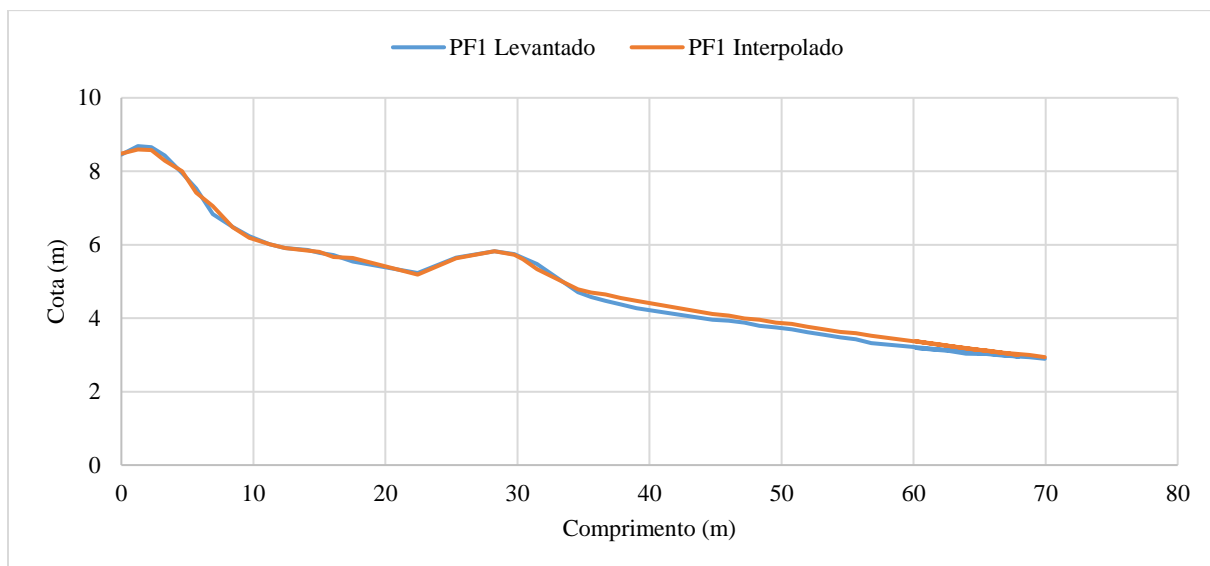
Anexo 3.2 – Comparação do perfil PF2 levantado e interpolado a partir do MDT da campanha 6.



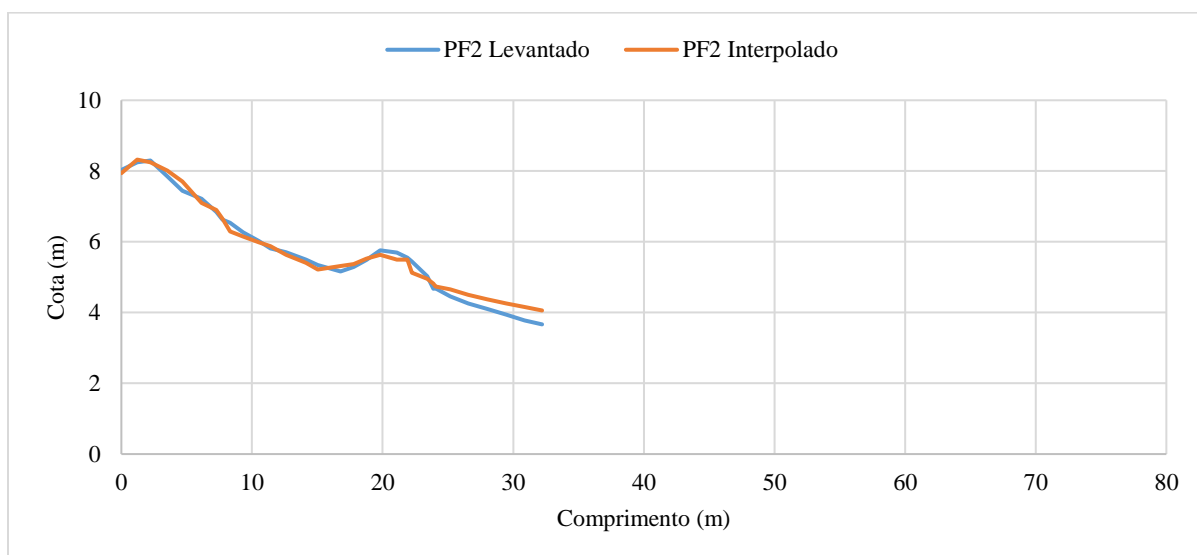
Anexo 3.3 – Comparação do perfil PF1 levantado e interpolado a partir do MDT da campanha 7.



Anexo 3.4 – Comparação do perfil PF2 levantado e interpolado a partir do MDT da campanha 7.



Anexo 3.5 – Comparação do perfil PF1 levantado e interpolado a partir do MDT da campanha 8.



Anexo 3.6 – Comparação do perfil PF2 levantado e interpolado a partir do MDT da campanha 8.

Anexo 4. Modelos Digitais de Terreno



Anexo 4.1 – Modelo digital de terreno obtido da campanha 2 (Maio de 2015).



Anexo 4.2 – Modelo digital de terreno obtido da campanha 3 (Dezembro de 2015).



Anexo 4.3 – Modelo digital de terreno obtido da campanha 4 (Fevereiro de 2016).



Anexo 4.4 – Modelo digital de terreno obtido da campanha 5 (Março de 2016).



Anexo 4.5 – Modelo digital de terreno obtido da campanha 6 (Junho de 2016).



Anexo 4.6 – Modelo digital de terreno obtido da campanha 7 (Setembro de 2016).

Anexo 5. Diagramas Vectoriais

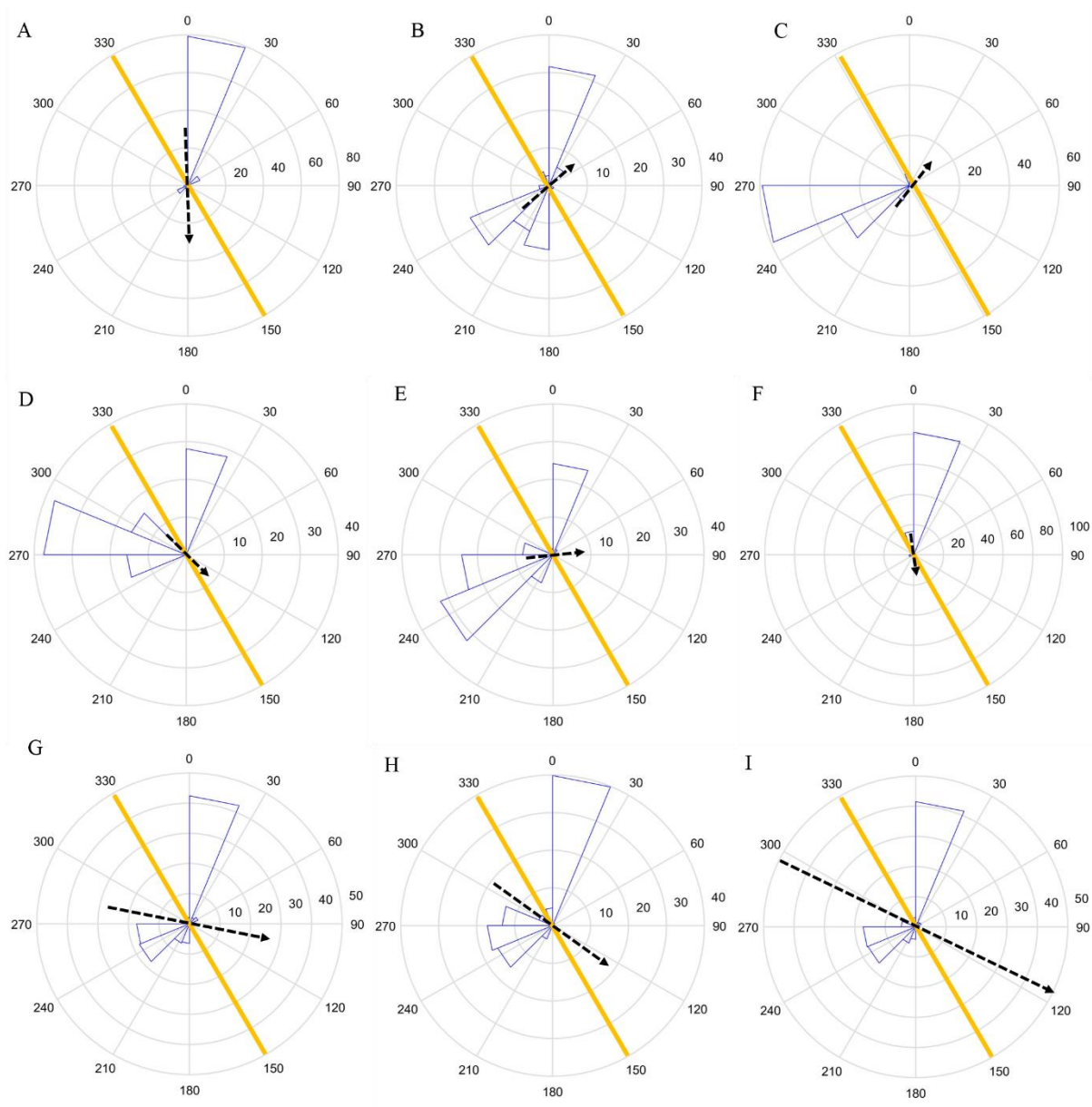
Anexo 5.1 – Orientação (azimute) e magnitude do vector resultante do transporte sólido potencial entre as campanhas consecutivas de monitorização da duna de São João da Caparica.

Campanhas	Azimute (°)	Magnitude (m/s)
1	358	1.80
2		
3	232	0.69
4	225	0.67
5	312	0.610
6	269	0.82
7	357	0.62
8 ³	-	-

Anexo 5.2 – Orientação (azimute) e magnitude do vector resultante do transporte sólido entre as campanhas de monitorização da duna de São João da Caparica.

Campanhas	Azimute (°)	Magnitude (m/s)
1 – 4	285	2.38
4 – 8	208	1.70
1 – 8	294	4.04

³ Entre as campanhas 7 e 8 foram determinadas apenas duas ocorrências de vento eficaz, assim, não se procedeu à determinação do vector resultante nem à construção do diagrama das distribuições direccionais das ocorrências de vento.



Escala:

-----> 0.5 m/s

— Orientação da duna de São João da Caparica

-----> Vector resultante do transporte sólido (m/s)

*Anexo 5.3 – Distribuição direccional dos ventos e resultante do transporte potencial entre campanhas de monitorização:
A – Campanhas 1 e 2; B – Campanhas 2 e 3; C – Campanhas 3 e 4; D – Campanhas 4 e 5; E – Campanhas 5 e 6; F –
Campanhas 6 e 7; G – Campanhas 1 e 4; H – Campanhas 4 e 8; I – Campanhas 1 e 8.*

